

水産総合研究センター 研究報告

28

平成21年3月

BULLETIN OF FISHERIES RESEARCH AGENCY

No. 28
March 2009

独立行政法人 **水産総合研究センター**
神奈川県横浜市
FISHERIES RESEARCH AGENCY
Yokohama, Kanagawa, Japan

Library
Pacific Islands Fisheries Science Center
2570 Dole St. Honolulu, HI 96822-2396

水産総合研究センター研究報告

第28号

平成21年 3 月

目 次

(博士号論文)

東シナ海産クロエソ *Saurida umeyoshii* および対馬海峡産トカゲエソ *Saurida elongata* の
資源生物学的研究

酒井 猛 1

(博士号論文)

イルカのソーナー能力の魚群探知機への適用に関する研究

今泉智人 47

(博士号論文)

魚類の聴性誘発反応に関する基礎的研究

須賀友大 115

(和文要旨) 171

水産教育研究機関誌

第100号

平成26年

目 次

(文部科学省)

水産教育研究機関誌の発行について

水産教育研究機関誌の発行について

水産教育研究機関誌の発行について

(水産庁)

水産教育研究機関誌の発行について

(水産庁)

水産教育研究機関誌の発行について

水産教育研究機関誌の発行について

(水産庁)

Digitized by the Internet Archive
in 2026

東シナ海産クロエソ *Saurida umeyoshii* および対馬海峡産トカゲエソ *Saurida elongata* の資源生物学的研究^{*1}

酒井 猛^{*2}

Study on the fisheries biology of lizardfishes, *Saurida umeyoshii* in the East China Sea and *Saurida elongata* in Tsushima/Korea Strait

Takeshi SAKAI

Abstract : The lizardfishes *Saurida* spp. are commercially important to the Japanese trawl-fisheries, and are utilized as surimi or fish cakes “kamaboko” in Japan due to its high meat yield, and high gel forming ability.

In recent years, stock levels of lizardfish have been low in the East China Sea similar to other demersal fishes. The Japanese large pair trawl fishery catch per unit effort of lizardfish in the East China Sea in 2006 was 9 % of that in 1982, and the landing of lizardfish from Japanese large trawl in the East China Sea decreased from 8585 metric tons in 1982 to 23 metric tons in 2006. Similarly, in the Tsushima/Korea Strait the landing of lizardfish from the Japanese offshore trawl also decreased by about 30 % between 1973 and 2006. Lizardfishes are commercially important to the Japanese trawl fisheries, assessment of lizardfish stocks and establishment of fishery management guidelines are urgently needed. The purpose of the present study is to update information on the biological characteristics, for formulating management proposals on the fishery in the East China Sea and Tsushima/Korea Strait.

1. To reveal the age and growth of the lizardfish, *Saurida umeyoshii* specimens collected from the East China Sea during the period from April 1998 to April 2000 were studied using polished thin sections of otolith. A total of 1052 individuals, ranging in size between 118 and 454mm fork length, were examined. The frequency of the appearance of the translucent band on the outer margin of the otolith and monthly changes in marginal growth increments indicated that ring marks (outer edge of translucent zone) were formed once a year between December and March. The von Bertalanffy growth curves were expressed as

$$\text{Males : } FL_t = 421.7 [1 - \exp \{-0.162 (t + 1.24)\}], (1 \leq t \leq 8)$$

$$\text{Females : } FL_t = 489.4 [1 - \exp \{-0.160 (t + 0.95)\}], (1 \leq t \leq 10).$$

2. Sexual maturity, annual reproductive cycle, and batch fecundity of the lizardfish, *Saurida umeyoshii*, were examined in specimens collected from the East China Sea between April 1998 and April 2000. The minimum FL at sexual maturity was 180 mm in males and 228 mm in females. Females with mature and spawning stage ovaries were collected between April and December, majorly between June and September when the mean gonadosomatic index was also high. This indicates that the spawning season extends from April and December, mainly from June and September. In the spawning stage ovary,

postovulatory follicles continued to degenerate and disappear until the most advanced oocytes attained the migratory nucleus and mature stage, suggesting that this species is a multiple spawner. Time course sampling showed that final oocyte maturation occurred during the daytime and subsequent ovulation occurred in the evening. Batch fecundity (BF) in females with mature oocytes was related to FL (mm):

$$BF = 1.70 \times 10^{-8} FL^{4.88} \quad (278 \leq FL \leq 421).$$

3. To reveal the age and growth of the lizardfish, *Saurida elongata*, specimens collected from Tsushima/Korea Strait during the period from May 1999 to June 2001 were studied using polished thin sections of otolith. A total of 695 individuals, ranging in size between 189 and 478mmFL, were examined. The frequency of the appearance of the translucent band on the outer margin of the otolith and monthly changes in marginal growth increments indicated that ring marks (outer edge of translucent zone) were formed once a year between November and February. The von Bertalanffy growth curves were expressed as

$$\text{Males: } FL_t = 422.3 [1 - \exp \{-0.202 (t + 1.30)\}], \quad (1 \leq t \leq 10)$$

$$\text{Females: } FL_t = 512.6 [1 - \exp \{-0.157 (t + 1.45)\}], \quad (1 \leq t \leq 11).$$

Our findings indicate that scale method is inadequate for age determination of lizardfish and it is necessary to reexamine the age and growth of Japanese lizardfish studied using scales.

4. Sexual maturity, annual reproductive cycle, and batch fecundity of the lizardfish, *Saurida elongata*, were examined in specimens collected from the Tsushima/Korea Strait between May 1999 and May 2002. The minimum FL at sexual maturity was 235 mm in males and 249 mm in females, and these were larger than *Saurida umeyoshii*. Females with spawning stage ovaries were collected between May and August, when the mean gonadosomatic index was also high. This indicates that the spawning season extends from May and August. In the spawning stage ovary, postovulatory follicles continued to degenerate and disappear until the most advanced oocytes attained the migratory nucleus and mature stage, suggesting that this species is a multiple spawner. Batch fecundity (BF) in females with mature oocytes was related to FL (mm):

$$BF = 0.00161 FL^{2.98} \quad (261 \leq FL \leq 445).$$

Key Words : lizardfish, *Saurida*, age, growth, reproduction

目 次

緒 言

マエソ属 *Saurida* の分類について

第1章 東シナ海産クロエソの年齢と成長

目 的

材料と方法

結 果

1. 尾叉長組成
2. 標示形成時期
3. 尾叉長と耳石長の関係
4. 計算尾叉長と成長式
5. 内臓除去体重と尾叉長の関係

考 察

第2章 東シナ海産クロエソの成熟と産卵

目 的

材料と方法

結 果

1. 生殖年周期
 - 1-1. 卵巣の各成熟段階の月別出現状況
 - 1-2. GSI の月別変化
2. 尾叉長別成熟度
3. 卵の発達様式と最終成熟過程
 - 3-1. 卵径組成
 - 3-2. 卵の最終成熟過程
4. バッチ産卵数

考 察

第3章 対馬海峡周辺におけるトカゲエソの年齢と成長

目 的

材料と方法

結 果

1. 年齢形質の妥当性の検証
2. 尾叉長組成
3. 標示形成時期
4. 尾叉長と耳石長の関係
5. 計算尾叉長と成長式
6. 内臓除去体重と尾叉長の関係

考 察

第4章 対馬海峡周辺におけるトカゲエソの成熟と産卵

目 的

材料と方法

結 果

1. 生殖年周期
 - 1-1. 卵巣の各成熟段階の月別出現状況
 - 1-2. GSIの月別変化
2. 尾叉長別成熟度
3. バッチ産卵数

考 察

要 約

謝 辞

参考文献

緒 言

東シナ海は広大な大陸棚を有し、大陸の大河川から豊富な栄養塩が流入する世界有数の漁場で、1,000種を超える魚類が生息している(依田ら, 2002)。しかし、周辺国の漁獲圧が高まり、近年、特に底魚類において資源状態が悪化してきた(時村, 1998)。東シナ海を主漁場とする以西底曳網漁業は1960年代には30万トン以上の漁獲を維持していたが以後急減し、1970年代前半に20万トン程度の漁獲となった。1980年頃までしばらくは20万トン程度の漁獲があったがさらに減少し、近年の漁獲量は数千トンである。漁場も、かつては東シナ海、黄海、渤海の一部と広大な海域に及んでいたが、近年では我が国周辺の陸棚縁辺域が主漁場である。東シナ海の底魚資源は、日本、韓国、中国などの漁船により長期間に渡って高い漁獲圧にさらされており、現在の資源水準は相当低位であると考えられている。東シナ海および周辺海域においては、資源全般の適切な管理と持続的な利用が必要であり、周辺国と連携し

た資源回復への取り組みが強く必要とされている(田中, 1998)。

東シナ海、黄海および対馬海峡周辺海域にはワニエソ、マエソ、クロエソ、トカゲエソ、コウカイトカゲエソ等多種のエソ類が生息し、主に底曳網漁業で漁獲され、練り製品原料として利用されている(山田ら, 2007)。エソ類は他の底魚類に比べ身色が白く、またゲル形成能にも優れ高級蒲鉾の原料となるため(志水, 1976)、重要な漁業資源として扱われている。しかしながら、東シナ海における以西底曳網漁業によるエソ類漁獲量は、1982年には8,585トンであったものが、2006年にはわずか23トンに激減し、同漁業(2そう曳き)のエソ類銘柄合計のCPUEは1982年にはおよそ23 kg/網であったものが、2006年には2 kg/網程度に激減した。また、東シナ海と接続する対馬海峡周辺は、黒潮起源の高塩分水や長江起源の低塩分水が混在して流入し、水深100 m前後の砂質底が広がる好漁場となっているが、この海域で行われている2そう曳き沖合底曳網漁業でもエソ類の水揚げが減少し、2006年のエソ類銘柄合計の水揚げ量は、1976年の水揚げ量のおよそ9%となっている。このため、これら魚種についても資源の現状把握と回復が強く求められている。

これらの資源の現状把握と管理には、年齢、成長、成熟、産卵、分布、回遊、被捕食関係等、基本的な生物情報が不可欠である。また生態学的に見ると、エソ類は魚食性が強く(岡田・久新, 1955; Hayashi *et al.*, 1960; 工藤・通山, 1963)、ハモ類と並んで東シナ海底魚類の中では最高位の捕食者であり、食物関係を通じて多種に与える影響は大きいため(三尾ら, 1984)、群集生態学的にも、エソ類に関する生物学的な情報の整備が重要であると考えられる。

かつて東シナ海で漁獲されるエソ類の多くは陸棚上に多く分布するワニエソであった(岡田・久新, 1955)が、新日中漁業協定以降、漁場が陸棚縁辺域へ収束してきていることに伴い、以西底曳網漁業においては、陸棚縁辺域を主分布域とするクロエソの重要性が高くなっている(山田ら, 2007)。しかしながら、クロエソについてはかつてマエソと混同されていたこともあり、資源生物学的基礎情報がほとんどなかった。またトカゲエソについては対馬海峡周辺で沖合底曳網漁業によって多量に漁獲されており、同海域のエソ類の中でも重要種でありながら、近年までコウカイトカゲエソと同種として扱われており資源生物学的な情報は不足していた。さらに、エソ類に関する知見は、分類の混乱に加え、信頼性に欠ける年齢形質の使用等の問題もあるため、再考の余地のあるものも多い。

また、基礎的な生物情報が把握されている東シナ

海周辺海域の多くの魚種について、資源量の減少に伴うと考えられる生物学的、生態学的変化が明らかとなっている(堀川・山田, 1999)。以西底曳網漁業によって漁獲されるワニエソ、タチウオ、シログチ、キグチ、マダイおよびキダイでは、資源の減少に伴い漁獲物の体長組成が変化し、大型個体が減少している(大滝, 1980)。クログチ、キグチでは同年齢群の大型化が見られ(佐藤, 1974; 三尾ら, 1975)、一方キダイでは同年齢群の小型化が報告されている(Oki and Tabeta, 1998)。生殖、産卵に関しても生物学的変化は起こっており、ワニエソ(山田ら, 1965; 山田, 1968)、キグチ(三尾ら, 1975; 大滝・庄島, 1978)、アカアマダイ(築山・多部田, 1997)、ウマヅラハギ(杉浦・多部田, 1998)、キダイ(Oki and Tabeta, 1998)、コウライマナガツオ(Buoyら, 1998)、タチウオ(山田, 1971; 呉・多部田, 1995)等で、産卵期の長期化、最小成熟体長の小型化、成熟年齢の低下、群成熟率の上昇、卵巣重量や抱卵数の増加等多くの現象が報告されている。クロエソ、トカゲエソ等についてもこれらの変化が想定されるため、年齢、成長、成熟、産卵等の生物情報をモニタリングすることが必要であるが、そのためにも、生物情報の基礎的知見の確立が急務である。

このように、漁業活動によって個体数が大きく減少すると個体群の生態が変化することは以前から知られており、この生態の長期的変化は、環境の変化による補償作用と、遺伝的な変異によるもの、二つの要因が関与していると考えられている(Rijnsdorp, 1993)。

補償作用に関しては、一般に、個体数が減少すると餌環境が改善され、その結果成長は早くなることが知られている(Rijnsdorp, 1993)。したがって早期に成熟サイズに達することになり、成熟年齢は低下する。また成魚では再生産へのエネルギー投資が大きくなり、卵数の増加、卵径の増大などの現象が見られる(Heino and Kaitala, 1999)。環境が元に戻ればこのような補償作用による生態変化も元の状態に戻ると考えられている。

一方、遺伝的な変異はより深刻な現象である。近年、漁業による淘汰は急激な種の進化的変化を引き起こしていることが指摘されている。一般的に、死亡率が上昇すると性成熟の早い遺伝子が選択的に残り、繁殖努力は増大する(Jørgensen *et al.*, 2007)。高い淘汰圧によってほんの数世代で多数の形質の遺伝的変異が起こることが人工飼育実験から分かっており(Reznick *et al.*, 1990)、また天然でも環境変化だけでは説明のつかない急激な成熟特性の変化が起こっていることが明らかとなった(Olsen *et al.*, 2004; Yoneda and

Wright, 2004; Jørgensen *et al.*, 2007)。乱獲によっていったん大きな遺伝的変化を起こした個体群は繁殖に関わる遺伝的多様性を失っており、漁獲圧が軽減されても資源の復活は困難になると考えられている(Olsen *et al.*, 2004)。漁業が遺伝的特性に与える影響を明らかにするには、漁獲、生物情報等、高精度の情報を収集、蓄積することが必要である。乱獲によりいったんマダラ資源が枯渇したカナダ沖や、複数国の漁業により長年にわたって高い漁獲圧がかけられてきた北海については長年にわたって資源評価、管理がなされてきており、またそれらに必要な漁獲情報、生物情報も高度に整備されている。

東シナ海周辺海域では、このような生物特性の変化は、これまでは主に補償作用によるものと考えられており、遺伝学的な検討はなされていないが、東シナ海の底層資源に起こっている生態の長期的な変化は、遺伝子組成の変化に起因するものである可能性が考えられる。こういった生物特性の長期的変化を捉え、また変化の要因を検討するには、北海のように年齢、成熟等の基礎情報を正確に収集、蓄積することが必要である。

今後、東シナ海において、国際的な資源管理の枠組みを策定し、さらに先進的な北海に匹敵するようなレベルに高めるには、遺伝学的な変化の検討も可能とするような生物情報のモニタリング体制の構築が不可欠である。このような、今後の一連の国際的な研究展開の基礎として、本研究では、東シナ海産クロエソおよび対馬海峡産トカゲエソについて、年齢、成長、成熟、産卵に関する特性を、その解析方法の検討も含めて詳細に明らかにしたものである。

マエソ属の分類について

我が国周辺海域に分布するマエソ属 *Saurida* にはいくつかの分類学的混乱が存在する。かつて我が国周辺にはマエソ *Saurida undosquamis* (Richardson, 1848)、ワニエソ *Saurida tumbil* (Bloch, 1795)、トカゲエソ *Saurida elongata* (Temminck and Schlegel, 1846) の3種が分布するとされてきた(松原, 1955)。これらは分布域が重複しており、また種の標徴となる形態的特徴に乏しいこともあり(町田, 1988)、重要な漁業対象種であるにも関わらず分類学的な再検討がなされないまま扱われてきた。しかしながら、近年の形態学的、遺伝学的な研究により、従来マエソとトカゲエソとして取り扱われたもののなかに、それぞれについて別種で取り扱うべきタイプの存在が指摘される等いくつかの分類学的な再検討が行わ

れている。

従来、我が国の標準和名でマエソとされてきたものには、分布域や形態が異なる2型が存在することが明らかとなった(山田・池本, 1979; 山田, 1986)。この2つの形態型にはアイソザイム分析(Yamaoka *et al.*, 1989)や、筋漿蛋白等電点電気泳動像による分析(夏莉, 1997)により、種レベルの遺伝的差異があることが報告された。一方それまでマエソにつけられていた *Saurida undosquamis* はオーストラリア産の標本をもとに記載されており、我が国周辺海域のいわゆるマエソとは側線鱗数や体色等が異なっていたため、マエソとクロエソに当てはめるべき学名に関しても不確定な状態となっていた(山田ら, 1992; 山田, 1993; 2000)。

Inoue and Nakabo (2006) はこれらについて分類学的な整理を行い、マエソには従来 *Saurida undosquamis* のシノニムとして扱われていた *Saurida macrolepis* (Tanaka, 1917) を、クロエソには新たに新種として記載し *Saurida umeyoshii* (Inoue and Nakabo, 2006) をあてることとした。本研究ではこれに従い、100m 以浅に分布し尾鰭上縁に黒色点列がないか、あっても輪郭がぼやける、また腹部が白いものをマエソ、100m 以深に分布し、尾鰭上縁に顕著な黒色点列をもち腹部が黒味を帯びるものをクロエソとして取り扱った。

従来、*Saurida microlepis* (Wu and Wang, 1931) はトカゲエソ *Saurida elongata* のシノニムとされてきたが、花淵(1971)はトカゲエソの中に脊椎骨数や側線鱗数の異なる2つのグループを認め、これらの形質の数値の小さいグループは南方寄りに、大きいグループは北方寄りに分布することを明らかにした。その後の形態学的観察の結果、山田ら(1992)は前者を *Saurida elongata* (トカゲエソ) としての学名をあて、後者を *Saurida microlepis* (コウカイトカゲエソ) とするのが妥当であるとした。一方、遺伝学的研究からは明瞭にこれらを別種として区別できる結果は得られておらず(西田ら, 1996)、トカゲエソとコウカイトカゲエソを別の独立種として扱うのが適切かどうかという点にはまだ問題が残されている。しかしながら、トカゲエソとコウカイトカゲエソは、隣接した海域で採集された個体に複数の体質的形質に明確な差異があることや生殖が隔離されていることにより、生態的には別種として取り扱った方が妥当と判断した。そこで本研究では、山田(2000)に従い、側線鱗数59~65、脊椎骨数56~61(通常59)のものをトカゲエソ *Saurida elongata*、側線鱗数64~70、脊椎骨数61~67(通常63~64)のものをコウカイトカゲエソ *Saurida*

microlepis として取り扱った。

ワニエソはかつて *Saurida tumbil* が学名としてあてられていたが、これとは別種であることが指摘され、新種 *Saurida wanieso* (Shindo and Yamada, 1972) と訂正された。

また我が国周辺のマエソ属には、マダラエソ *Saurida gracilis* (Quoy and Gaimard, 1824)、ウチウミマダラエソ *Saurida nebulosa* (Valenciennes, 1849)(鈴木ら, 1995)、コソデエソ *Saurida micropectoralis* (Shindo and Yamada, 1972)(宮原ら, 2002)の3種も含まれるが、これらは奄美、沖縄、小笠原の沿岸を主な分布域としており、積極的な利用はされていない。

第1章 東シナ海産クロエソの年齢と成長

目 的

クロエソは高知沖および九州沿岸から台湾に至る海域の水深100~200 mの陸棚縁辺域砂泥底に生息するエソ科魚で、他のエソ類と同様に高級練り製品の原料として利用されている(山田ら, 2007)ため、日本では重要な漁業資源として取り扱われている。本種は東シナ海のマエソ属魚類の中では最も深みに分布している。近年、以西底曳網漁業の漁場が陸棚縁辺部に収束してきたことにより、以西底曳で漁獲されるエソ類の中での本種の割合は増加している(山田ら, 2007)。

東シナ海でのクロエソは主に以西底曳網漁業によって漁獲されている。以西底曳のエソ類漁獲量は、1982年には8,585トンであったが、2006年にはわずか23トンに激減している。また以西底曳網漁業(二そう曳き)のエソ類銘柄合計のCPUEは1982年にはおよそ23 kg/網であったが、2006年には2 kg/網程度へと激減している。これは近年以西底曳の漁場が陸棚縁辺域に収束し、主として陸棚域に分布するマエソやワニエソの漁獲が減少したことも一因であると考えられるが、周辺各国による高い漁獲圧が大きく影響していると考えられる(塚本・山本, 2007)。

キグチ、シログチ、ハモ、マナガツオ類、カレイ類等、以西底曳で漁獲される底魚類のうち主な分布域が我が国EEZ外にある資源は、全てが低水準である。エソ類も同様で、我が国の漁獲努力量の著しい減少にも関わらず、依然として資源状態は悪い。本海域の資源を持続的に利用していくためには周辺国による適切な資源管理が必要である。資源管理には、年齢、成長、成熟、産卵、分布、回遊、被捕食関係等、基本的な生物情報が不可欠であるが、エソ類に関しての分類学的な問題も影響し、本種は水産重要種であるにも関わら

ず、資源生物学的情報の整備は立ち後れていた。
本章では、東シナ海産クロエソの資源の評価や管理を行うために必要な情報となる年齢、成長に関する資源生物学の諸特性をその解析方法も含めて詳細に検討し、明らかにすることを目的とした。

材料と方法

1998年4月から2000年4月にかけて以西底曳網漁船によって東シナ海で漁獲され、長崎もしくは福岡に水揚げされたクロエソおよび、第1・第2・第21・第22山田丸、第1・第2長運丸、海邦丸、熊本丸、陽光丸、但州丸の各船で得られたクロエソ計1,052個体を用いた (Table 1; Fig. 1)。
供試魚は、生鮮状態で、尾叉長 (FL)、体重、内臓除去重量 (BW)、生殖腺重量の測定を行った後、耳石 (扁平石) を摘出し、70 % エタノールで保存した。尾叉長は、体長測定板を用いて1 mm 単位で計測した。各重量の測定については、陸上ではデジタル重量計を用い、体重および内臓除去重量を1 g 単位、生殖腺重量を0.1 g 単位で測定した。船上では竿秤を用い、体重、内臓除去重量および生殖腺重量を1 g 単位で測定した。
年齢形質として、耳石、鱗、椎体を予備的に観察したところ、鱗は、同部位から採取した鱗によって輪紋の形成状況が異なっており、輪紋も不明瞭で年齢形質としては不適であると判断した。また椎体においては、

輪紋構造は観察されたものの、特に大型個体で外縁部の輪紋が不明瞭で、また椎体径も同サイズの他魚種と比べ小さく、読み取りが困難であった。耳石は、そのままでは縁辺部の輪紋構造が明瞭でなかったが、矢状切片標本を作製し観察したところ明瞭な輪紋が観察された。このため本研究では耳石を年齢形質として用い、観察、測定を行った。
耳石はスライドガラス上でエポキシ樹脂に包埋し、400~1,000番の研磨紙で耳石の成長起点が明瞭になるまで矢状面を研磨した。観察は実体顕微鏡および万能投影機で10倍に拡大し、反射光下で行った。耳石の矢状断面には幅の広い不透明帯と幅の狭い透明帯が交互に観察された (Fig. 2)。このため、標示を透明帯外縁と規定し、耳石の成長起点 (F) から耳石後端部までの直線の長さを耳石長 (R, mm)、F から各標示までの長さを標示長 (r_n , mm) として標示の読みとりと測定を行った。なお、処理中に耳石が破損してしまった個体および標示の一部が不鮮明であった個体については、年齢査定の解析から除外した。
耳石の標示形成時期は、耳石最外縁部が透明帯である個体の月別出現状況と、縁辺成長率 (MIR) の月別変化より判断した。縁辺成長率は次式により求めた。
$$MIR = (R - r_{max}) / (r_{max} - r_{max-1})$$
$$r_{max} \text{ ; 最大標示の標示長 (mm),}$$
$$r_{max-1} \text{ ; 外から2番目の標示長 (mm)}$$

各標示形成時の計算尾叉長は body proportional hypothesis (BPH) 法 (Francis, 1990) を用いて推定

Table 1. Monthly number of *Saurida umeyoshii* examined for each fishery statistical areas by the Fisheries Agency

		Fishery statistical area by the Fisheries Agency																														
Year	Month	234	235	238	246	249	250	453	462	463	472	474	475	481	484	485	494	496	497	498	505	507	508	511	517	518	527	537	538	Unknown	Total	
1998	Apr				16																48										64	
1998	May													41																16	57	
1998	Jun								78			4	1							18								9	6	116		
1998	Jul																27														27	
1998	Aug																											16			16	
1998	Sep																							1		24					25	
1998	Oct																									4					4	
1998	Nov																										55				55	
1999	Jan					2			11	15																					28	
1999	Feb										10				3	3		3													19	
1999	Mar	27																													27	
1999	Apr		100																												100	
1999	May																													65	65	
1999	Jun						1		2								19	3			121	19			16						181	
1999	Jul							6								1									2	4	1			10	24	
1999	Aug								2	12	3																				17	
1999	Sep					6	3																								9	
1999	Oct	43																													16	59
1999	Nov																	66													66	
1999	Dec																													48	48	
2000	Feb	23																														23
2000	Mar			17																												17
2000	Apr																														5	5
Total		93	100	17	16	8	4	6	15	105	3	14	1	41	3	4	46	6	66	18	48	121	19	1	18	4	84	16	9	166	1052	

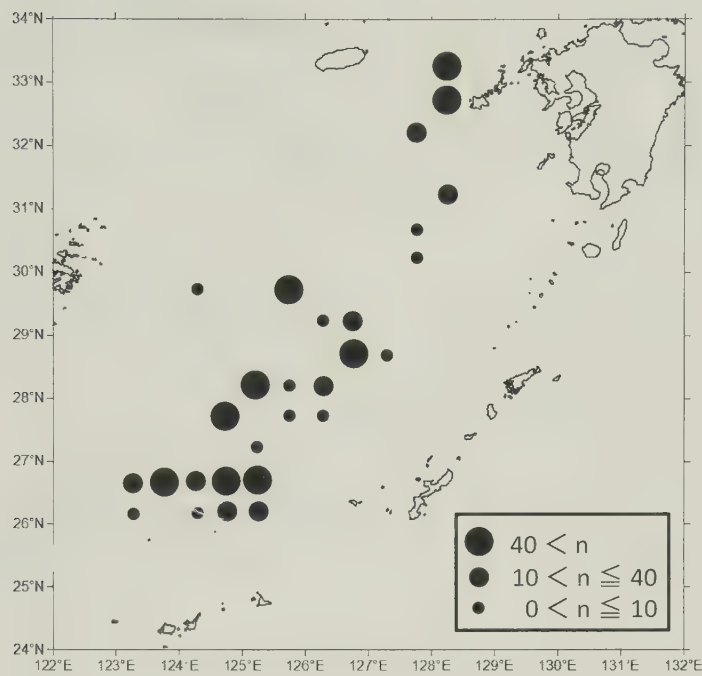


Fig. 1. Geographical distribution of specimens of *Saurida umeyoshii* collected in the East China Sea. n: number of fish examined.

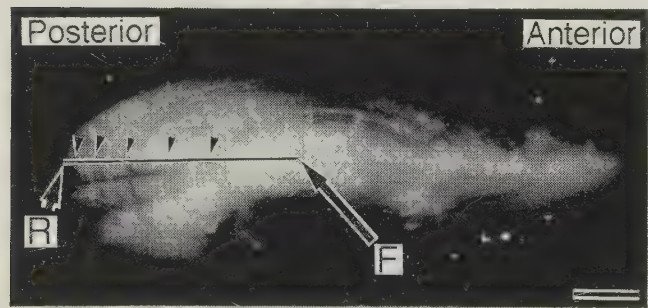


Fig. 2. Ring mark reading of otolith from female *Saurida umeyoshii* (254 mmFL) with five ring marks. Arrowhead indicates the ring mark on the outer margin of the translucent band used for ring radius measurements. Bar = 1 mm (F, focus; R, otolith radius).

した。BPH 法による計算尾叉長は以下の式により求められる。

漁獲時の尾叉長と耳石長の関係式：

$$\ln FL_c = a + b \ln R \quad (1)$$

標示形成時の計算尾叉長と各標示長の関係式：

$$FL_n = (r_n / R)^b FL_c \quad (2)$$

FL_c ：漁獲時の尾叉長 (mm), FL_n ； n 標示時の計算尾叉長 (mm), b ：(1)式の傾き

BPH 法で求められた各標示形成時の計算尾叉長をもとに von Bertalanffy の非線形成長モデルを用い、本種の成長を推定した。von Bertalanffy 成長式の推定には全計算尾叉長を用い、最小二乗法で当てはめを行った。計算には Kaleida Graph 4.0 (Synergy Software, USA) を用いた。

結 果

1. 尾叉長組成

雄305個体、雌747個体の尾叉長を測定した結果、最小尾叉長は雄118 mm、雌143 mm、最大尾叉長は雄382 mm、雌454 mm、平均尾叉長は雄262.6 mm、雌312.7 mm であった。雌雄により尾叉長組成が異なり、雄では82 % の個体が尾叉長220～320 mm、雌では75 % の個体が尾叉長260～380 mm であった (Fig. 3)。

2. 標示形成時期

耳石最外縁部に透明帯を持つ個体は4～7月には出現せず、8～9月には20 % 以下の出現率であった。その後急増し、11～2月は60 % 以上の個体で耳石外縁部が透明帯であったが、3月には急減しその割合は約30 % となった (Fig. 4)。

縁辺成長率の平均は12月に最低で、月を追うごとに上昇して11月が最高となった。また、12～3月の標本で最外部の標示を除外して算出した縁辺成長率は、11月から連続して上昇していた (Fig. 5)。これらの結果より、標示形成時期は12～3月と推定された。

3. 尾叉長と耳石長の関係

尾叉長と耳石長は雌雄ともに高い相関が認められ (Fig. 6)、それらの関係式は次式により示された。

$$\begin{aligned} \text{雄} : \ln FL &= 4.39 + 0.89 \ln R \\ (r^2 &= 0.83, n = 222) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{雌} : \ln FL &= 4.32 + 0.99 \ln R \\ (r^2 &= 0.89, n = 536) \end{aligned}$$

雌雄の関係式には傾き、切片ともに有意差が認められた (ANCOVA, $p < 0.01$)。このため、計算尾叉長の算出には雌雄別々の関係式を用いた。

4. 計算尾叉長と成長式

標示の観察の結果、雄では最大9標示、雌では最大

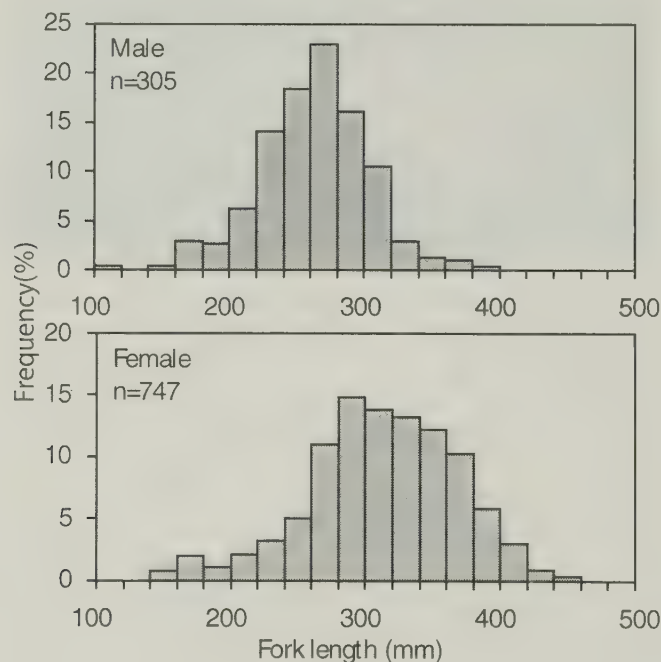


Fig. 3. Length-frequency distribution for male and female *Saurida umeyoshii* sampled from the East China Sea. n, number of fish examined.

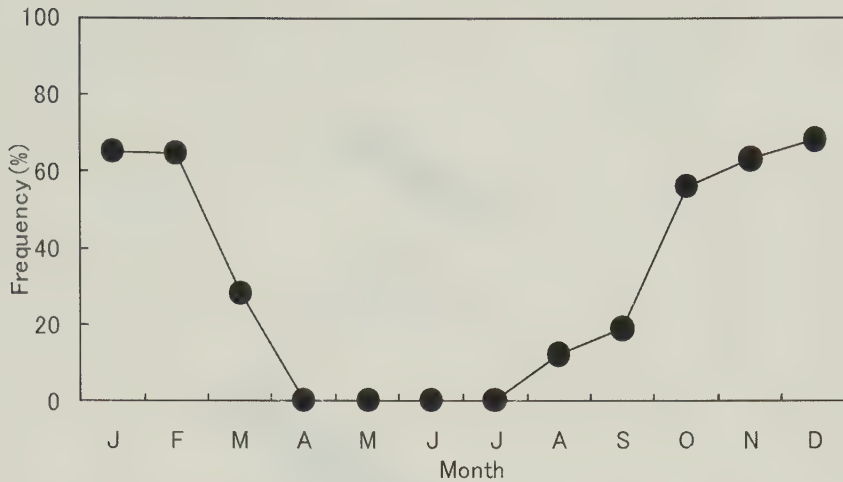


Fig. 4. Monthly changes in the frequency of appearance of a translucent band on the outer margin of the otolith of *Saurida umeyoshii*. n: number of fish examined.

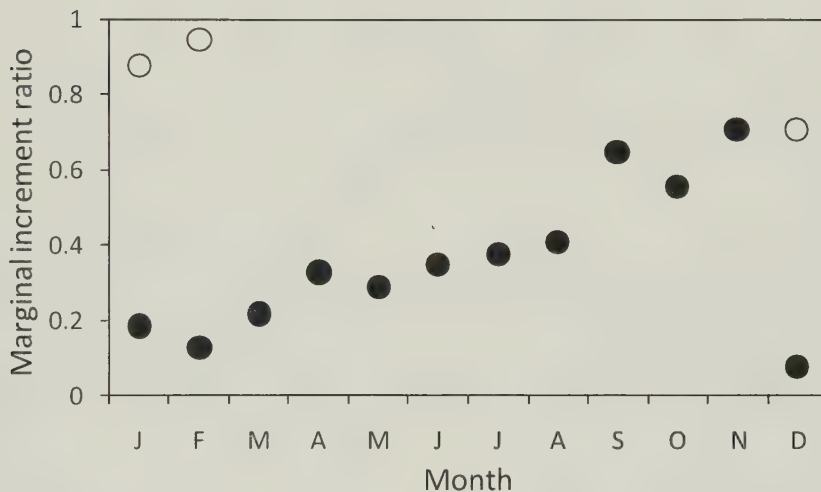


Fig. 5. Monthly changes in the mean marginal increment ratio of the otolith of *Saurida umeyoshii* (closed circles). Open circles indicate the mean marginal increment ratio of otoliths without new opaque bands observed during the period between December and February. n: number of fish examined.

11標示まで認められた (Table 2)。クロエソの産卵盛期は6～9月である (2章, 生殖年周期参照)。このため, 本種の産卵盛期は標示形成時期 (12～3月) よりも半年ほど前であると考えられる。したがって, 平均計算尾叉長を, 各標示数から0.5を減した年齢のものとみなし, 雌雄別に成長式を推定した (Fig. 7)。雌雄の成長式は次式により示された。

$$\text{雄: } FL_t = 421.7(1 - e^{-0.1616(t+1.238)}) \quad (1 \leq t \leq 8)$$

$$\text{雌: } FL_t = 489.4(1 - e^{-0.1596(t+0.948)}) \quad (1 \leq t \leq 10)$$

5. 内臓除去体重と尾叉長の関係

内臓除去体重と尾叉長の関係は以下の式で表され, 雌雄の関係式には有意差が認められた (F -test, $p < 0.01$) (Fig. 8)。

$$\text{雄: } BW = 0.516 \times 10^{-5} FL^{3.08} (r^2 = 0.92, n = 305)$$

$$\text{雌: } BW = 0.358 \times 10^{-5} FL^{3.15} (r^2 = 0.97, n = 747)$$

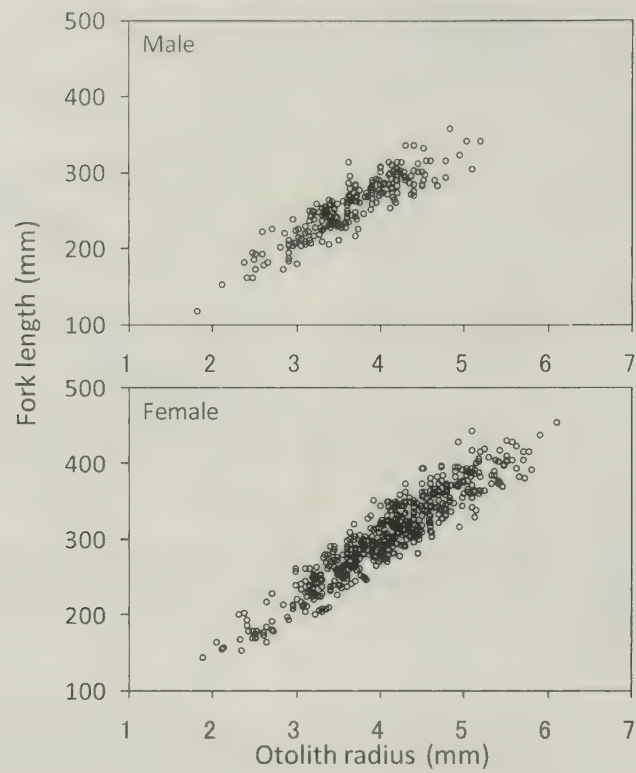


Fig. 6. Relationship between fork length and otolith radius for male and female *Saurida umeyoshii*.

Table 2. Mean back-calculated fork lengths (FLi, mm) at each ring group for *Saurida umeyoshii* from the East China Sea (i, number of ring mark; n, number of fish examined)

Ring group	n	Back calculated length										
		FL ₁	FL ₂	FL ₃	FL ₄	FL ₅	FL ₆	FL ₇	FL ₈	FL ₉	FL ₁₀	FL ₁₁
Male												
1	1	93.2										
2	6	103.1	155.2									
3	32	106.5	154.4	195.5								
4	55	101.5	152.0	191.9	225.1							
5	76	103.1	151.4	192.1	225.7	255.0						
6	30	102.3	149.4	192.6	227.5	256.4	279.8					
7	18	100.6	143.0	186.8	216.9	245.8	275.5	294.6				
8	2	103.5	158.6	199.0	230.4	266.9	300.9	321.0	341.3			
9	1	105.9	149.6	185.9	218.5	258.1	292.9	323.8	341.8	357.7		
Mean (weighted)	221	102.8	151.2	192.2	224.9	254.2	279.4	298.5	341.5	357.7		
Female												
1	1	113.5										
2	15	102.5	158.2									
3	64	98.7	154.5	200.6								
4	122	104.0	163.1	213.0	254.4							
5	123	99.9	159.7	212.0	254.9	291.8						
6	90	99.0	156.4	205.6	248.1	285.5	317.9					
7	54	104.7	156.9	202.8	245.0	282.1	319.8	349.5				
8	41	103.2	153.5	197.3	236.7	274.1	308.8	339.4	368.3			
9	12	95.6	148.9	195.0	237.0	270.6	303.3	335.8	365.8	392.1		
10	11	97.0	150.9	192.9	230.4	265.7	294.1	320.9	349.0	375.8	396.3	
11	3	97.0	149.4	187.6	217.4	248.7	279.9	305.1	327.1	355.9	385.4	406.1
Mean (weighted)	536	101.2	158.0	206.7	249.3	284.4	314.0	341.0	362.8	381.0	393.9	406.1

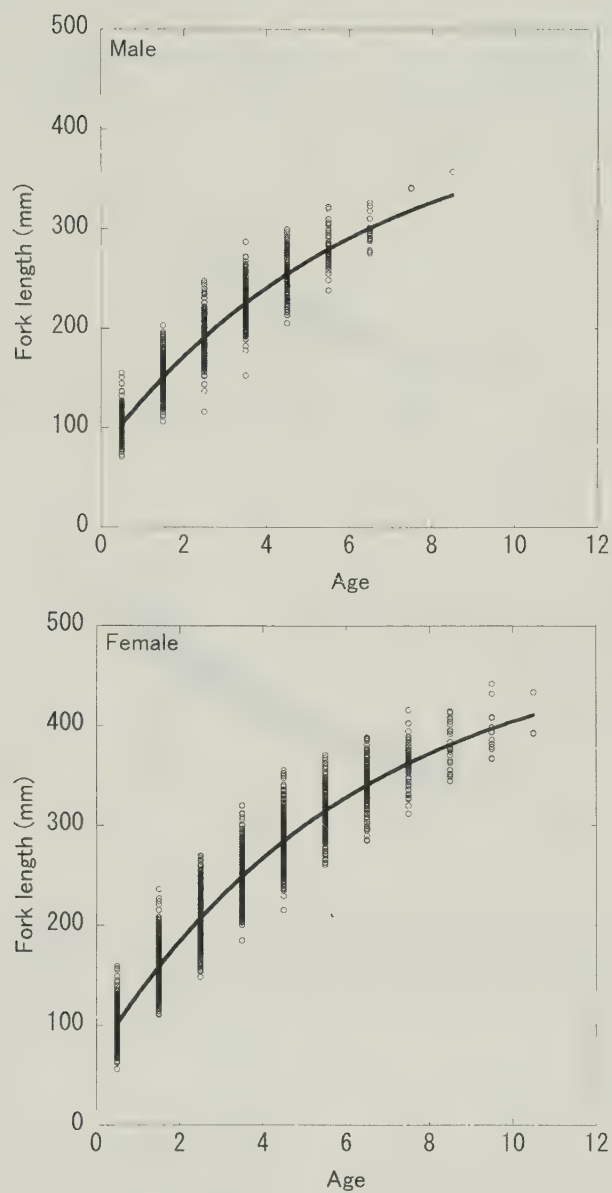


Fig. 7. von Bertalanffy growth curve for male and female *Saurida umeyoshii*. Circles are the back-calculated fork length at ring formation.

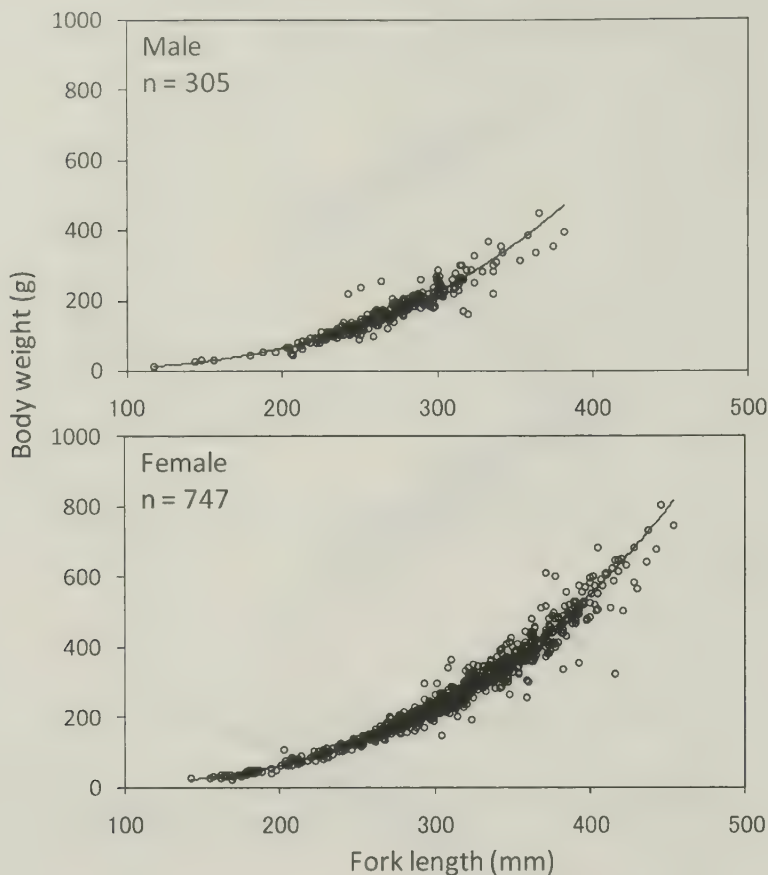


Fig. 8. Relationship between body weight and fork length for male and female *Saurida umeyoshii*. n: number of fish examined.

考 察

本研究ではクロエソの耳石外縁部における透明帯の出現状況と縁辺成長率の変化から、耳石の標示は年一回、12～3月に形成されると考えられた。このため標示を年輪と規定し、雌雄の成長式を求めた結果、クロエソの最高年齢は、雄で8歳、雌で10歳となり、雌は雄に比べ寿命が長く、成長も良いと考えられた。von Bertalanffy の成長曲線から推定される最大到達体長は雄421.7 mm、雌で489.4 mmであった。雌の成長が雄に比較して良いという結果は他のエソ類にも見られる。また、尾叉長組成からも、雌の方が大型になることが示唆された。

過去日本近海のマエソ属の研究 (Table 3) において観察された最高年齢は、東シナ海産マエソ、ワニエソ、トカゲエソで雌雄ともに4歳 (相川ら, 1949)、紀伊水道域のマエソで雄2歳、雌3歳 (多々良, 1953; 阪本, 1977)、瀬戸内海のマエソで雄3歳、雌

4歳 (多々良, 1965)、紀伊水道のトカゲエソで雌雄ともに4歳 (高尾, 1953) であった。また東シナ海、黄海産ワニエソの寿命は雌雄ともに5～6歳であろうと推定されている (岡田・久新, 1955)。これらの知見は今回明らかにしたクロエソの成長に比べて、成長が速く、寿命が短い傾向が顕著である。これは海域や種の相違による成長速度の違いであるとも考えられるが、むしろ年齢形質に鱗を使用したためであると推定される。

近年、年齢形質としての鱗の信頼性については疑問が呈されるようになってきている (Beamish and McFarlane, 1983; Carlander, 1987; 渡邊, 1997)。年齢組成や体成長速度の推定は、水産資源の解析において最も重要な項目の1つであり、推定の手法として体長組成法、飼育法、標識放流法、年齢形質法が用いられている (能勢ら, 1988)。このうち魚類の年齢形質法では、年齢形質として鱗、椎体、耳石、射出骨、鰓蓋骨等の硬組織が用いられる (渡邊, 1997)。鱗は魚

Table 3. Growth estimated for *Saurida* spp. and the methods of age determination from various localities by different authors

Species	Sampling Area	Method	Sex of fish	Estimated fork length attained in mm at each age											References
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
<i>S. umeyoshui</i>	East China Sea	Otolith	Male	128	172	209	241	268	291	310	327				Present study
			Female	131	184	229	267	300	328	352	372	389	404		
<i>S. elongata</i>	Tsushima / Korea Strait	Otolith	Male	157	205	245	278	304	326	343	358	370	379		Present study
			Female	164	214	258	295	326	353	377	396	413	428	440	
<i>S. spp</i>	East China Sea	Scale	Unsexed	162	230	293	380								Aikawa et al., 1949
<i>S. elongata</i>	Kii Channel, Japan	Scale	Male	131	199	256	311								Takao, 1953
			Female	162	225	282	330								
	Southwest Japan	Scale	Unsexed	110	146	190	244	296	348	384					Yokota, 1956
			Unsexed	110	160	200	250	300	340	380					
<i>S. wanieso</i>	East China Sea / Yellow Sea	Scale	Male	152	266	362	430	474							Okada and Kyushin, 1955
			Female	152	273	378	462	524							
	East China Sea / Yellow Sea	Scale	Male	162	267	339	399	487							Okada and Kyushin, 1955
			Female	177	284	364	457	534	522						
	East China Sea	Scale	Male	120	223	292									Hamada, 1986
			Female	128	259	358	433								
<i>S. macrolepis</i>	Kii Channel, Japan	Scale	Male	106	171										Tatara, 1953
			Female	106	195	255									
	Southwest Japan	Scale	Unsexed	100	160	210	270	340	400	450	500				Yokota, 1956
	Seto Inland Sea, Japan	Scale	Male	180	230	290									
			Female	200	250	310									Tatara, 1965
<i>S. undosquamis</i>	Arabian Sea	Scale	Unsexed	161	238	302	350								Budnichenko and Nor, 1978
	Taiwan Strait	Vertebra	Male	140	192	235	271	301	325	345					
			Female	127	180	229	272	312	347	380	409	435	459		Lee et al., 1986
	Northwest shelf of Australia	Vertebra	Male	122	176	223	264	301	334	363	389				
			Female	111	168	218	262	301	336	366	393	417			Wen et al., 1987
	Southern Taiwan Strait	Scale	Male	136	195	241	276	303	324						
			Female	147	204	256	302	344	382	415	446				Lee and Yeh, 1989
			Female	147	204	256	302	344	382	415	446				
<i>S. tumbil</i>	Taiwan Strait	Scale	Male	147	215	293	348								Tung and Lien, 1965
			Female	149	239	325	412	475							
	Arabian Sea	Scale	Unsexed	176	270	340	391	434							Budnichenko and Nor, 1978
	East China Sea	Scale	Male	157	210	257	300	338	370						
			Female	166	220	276	324	366	403	435					Yeh et al., 1977
	Gulf of Tonkin	Scale	Male	169	216	256	299	334	376	402					
			Female	173	225	284	327	373	419	447					Rao, 1984
	Bay of Bengal, India	Length frequency	Unsexed	254	393	472	517	542							
	Southern East China Sea	Length frequency	Male	147	180	211	239	264	287						Tzeng et al., 2002
			Female	154	191	226	257	286	313	338					
			Unsexed	123	184	238	285	326	362	394	422				
	Mumbai, India	Length frequency	Unsexed	313	464	537	572	589	600						Jaiswar et al., 2003
			Unsexed	313	464	537	572	589	600						

類において最も古くから一般的に用いられてきた年齢形質である (Suzuki and Kimura, 1990; 菅野, 1997) が、脱落、再生鱗の形成、体液中のカルシウム不足による石灰部分の再吸収、成長停滞に伴う鱗成長の停滞等の問題点があり、特に高齢魚においては鱗による年齢の過小査定が著しいという知見もある (Beamish and McFarlane, 1987)。一方耳石は鱗と異なり、いったん結晶構造が形成されると再吸収されることはないと考えられている (Jones, 1992; 渡邊, 1997)。エソ類についても、Lee *et al.* (1986) は *Saurida undosquamis* の鱗と椎体とで出現輪紋数を比較し、年齢が高くなるほど鱗の輪紋数を過小評価する危険性が増加することを示した。これらの理由により、過去、我が国周辺のエソ類において行われた鱗による年齢査定は年齢を過小評価していた可能性があると言える。

我が国以外のマエソ属の成長 (Table 3) を見ると、*Saurida tumbil* の寿命は体長組成からの年齢推定によ

り、東シナ海南部で8歳 (Tzeng *et al.*, 2002)、ベンガル湾北西部で5歳 (Rao, 1984)、ムンバイ沖で6歳 (Jaiswar *et al.*, 2003) と推定されている。鱗を用いた年齢査定では、アラビア海では8歳 (Budnichenko and Nor, 1978)、台湾海峡では5歳 (Tung and Lien, 1965)、東シナ海およびトンキン湾では7歳 (Yeh *et al.*, 1977) まで出現している。一方、*Saurida undosquamis* については鱗を用いて年齢査定がなされた結果、アラビア海で最高6歳 (Budnichenko and Nor, 1978)、台湾海峡では最高8歳を示す個体が出現し、椎体での査定では台湾海峡南部の雄で7歳、雌で10歳 (Lee *et al.*, 1986)、オーストラリア北西岸においては雄で8歳、雌では9歳 (Wen *et al.*, 1987) を示す個体が観察されている。このように我が国以外においても過去のマエソ属の成長の推定には耳石以外の形質が使用されており、結果に誤差を含んでいる危険性がある。今後、マエソ属の種内および種間において

成長に関する比較生態学的研究を展開するためには耳石による正確な年齢査定が必要である

年齢は、成熟、移動、加入等に関わる重要な情報で (Summerfelt, 1987)、年齢査定の誤差は、資源評価や資源管理方策に大きな影響を与える (福島・渡邊, 1990)。形質法を用いて正確な年齢査定を行うには、信頼性の高い年齢形質の使用が前提であり、過去年齢形質の妥当性が充分検討されないまま行われた年齢査定や成長解析については、今後その妥当性を再検討し、最適な方法で再解析していくことが必要であると考えられた。

資源の減少に伴う生物学的特性の変化は成長にも見られることが知られており (Jørgensen *et al.*, 2007)、以西底曳網漁業で漁獲される魚種についてもいくつかの報告がある。シログチ、キグチ、マダイ、キダイ、タチウオ、ワニエソでは、1960年代以降大型個体が減少している (大滝, 1980)。またクログチ (佐藤, 1974)、キグチ (三尾ら, 1975) では同年齢群の大型化が報告されている。一般に、同年齢群の大型化は競合する個体の減少による餌環境の改善に伴うものと推測される (Rijnsdorp, 1993)。しかし、逆に同年齢群の小型化も、キダイ (Oki and Tabeta, 1998) とコウライマナガツオ (Buoy ら, 1998) で明らかとなっており、これは密度効果では説明の困難な現象である。これら2種の同年齢群の小型化は、個体群の遺伝子組成の変化によって引き起こされている可能性がある。つまり、漁業活動が大型魚や高齢魚に対して高い漁獲圧をかけた結果、体成長より再生産により多くエネルギー投資を行う、若齢で成熟する遺伝形質を持つ個体の生残や繁殖成功度が高くなった結果であると考えられる。エソ類に関しても、ワニエソで成熟個体の小型化が報告されており、これは餌環境の改善によって、より小型の個体で繁殖投資が可能となったものと考えられている (山田ら, 1965)。しかしこの現象は、栄養状態や成長の改善を伴わない、繁殖に偏ったエネルギー投資が行われた結果であるとも考えられる。栄養状態の改善を伴わない場合、成長に投資されていたエネルギーが再生産に投下されることになるため、成長が遅くなることが考えられる。このように漁業が特定の遺伝的形質を持つ個体を選択的に漁獲した場合、成長、繁殖特性の多様化が減少し、環境変動に対して脆弱になってしまう可能性がある。また、いったん遺伝的变化を起こしてしまった個体群は資源の回復力を失っており、環境が改善しても資源量の回復が困難になることがあると考えられている (Olsen *et al.*, 2004)。

クロエソについても資源量の増減によって成長特性に変化が現れることは充分考えられ、現象を追跡しその要因を明らかにするためには今後も年齢、成長特性に関する情報の蓄積が必要である。

第2章 東シナ海産クロエソの成熟と産卵

目 的

前述のように、クロエソは、従来マエソと同種であるとみなされてきた (Inoue and Nakabo, 2006)。これまで両種を混同して取り扱ってきたため、成熟と産卵に関する情報を含め、本種の生物学的諸特性は全く知られていなかった。

東シナ海においてはクロエソも他の底魚類と同様高い漁獲圧にさらされ、その資源状態は低位にあるものと考えられるが、本種は主に我が国 EEZ 内である陸棚縁辺部を生息域としているため、ワニエソ、マエソ等の主として陸棚上に生息する種と比較すると、韓国、中国漁船の漁獲圧を受けにくいものと考えられる。魚類は、その種の資源量の変動によって補償作用及び遺伝的作用による生物学的、生態学的変化が見られるが、クロエソについても同様の変化が起こっている可能性がある。本種については過去の成長、産卵等に関する知見がないため、過去の情報との比較はできないが、今後生殖、成長などの特性が変化していくことは充分考えられる。こういった現象を捉えるためにも、生物学的諸特性を明らかにしておくことは重要である。

我が国周辺のエソ類の成熟に関しては過去、瀬戸内海産 (多々良, 1965) マエソの成熟期、山口県内海産マエソおよびトカゲエソの成熟期 (八柳ら, 1953; 前川, 1961)、瀬戸内海産マエソおよびトカゲエソの成熟期 (南西海区水産研究所, 1972)、東シナ海産ワニエソの成熟期と産卵数 (山田, 1968)、東シナ海、黄海産ワニエソの産卵期と産卵数 (岡田・久新, 1955) などの知見がある。しかし、これらの情報は肉眼での卵巣の観察や生殖腺重量の変化に基づくもので、組織切片の観察に基づく産卵期の推定や、時間帯別の詳細な卵径組成変化についての報告はなく、エソ類の生殖生態についての情報は断片的である。

本章では、組織学的観察により卵巣の成熟段階を規定し、これに基づいてクロエソの卵巣の月別出現状況、成熟尾叉長およびバッチ産卵数の推定を行い、クロエソの資源の評価や管理を行うために必要な成熟、産卵特性に関する情報を詳細に明らかにすることを目的とした。

材料と方法

1章と同様、1998年4月から2000年4月にかけて東シナ海で漁獲されたクロエソ計1,052個体を用いた (Table 1; Fig. 1)。

供試魚は、生鮮状態で、尾叉長 (FL)、体重、内臓除去重量 (BW)、生殖腺重量の測定を行った。尾叉長は、体長測定板を用いて1 mm 単位で計測した。各重量の測定については、陸上ではデジタル重量計を用い、体重および内臓除去重量を1 g 単位、生殖腺重量を0.1g 単位で測定した。船上では竿秤を用い、体重、内臓除去重量および生殖腺重量を1 g 単位で測定した。

摘出した生殖腺は組織標本作製用にブアン氏液で固定した。また産卵期の一部の個体の卵巣を10 %ホルマリン液で固定し、卵径測定用に5個体および卵数算定用に14個体の卵巣を用いた。ブアン氏液で固定した生殖腺の中央部を切り出し、エタノールで脱水後メタクリル樹脂 (Technovit 7,100, Kulzer) で包埋した。滑走式ミクロトームで2.5 μ m の樹脂切片を作製し、1 %トルイジンブルーで染色後、光学顕微鏡で組織観

察を行った。Yamamoto (1956) を参考に、本種の卵の発達段階を区分し (Fig. 9)、組織学的観察に基づいて卵巣の成熟段階を次の6期に区分した。

未成熟期 (Immature stage: Im) : 周辺仁期 (Perinucleolus stage), 卵黄胞期 (Yolk vesicle stage) の卵のみで構成される。

発達期 (Developing stage) : 最も発達した卵が卵黄形成前期 (Primary yolk stage) (小型の卵黄球が細胞質の周辺部に認められる) もしくは卵黄形成後期 (Late yolk stage) (大型の卵黄球が細胞質全域に認められる) に達している。この期については、卵黄の蓄積状況により前期 (Early developing stage: Ed) と後期 (Late developing stage: Ld) に区別した。

成熟期 (Mature stage: M) : 最も発達した卵が胚胞移動期 (Migratory nucleus stage), もしくは成熟期 (Mature stage) に達している。

産卵期 (Spawning stage: Spa) : 卵黄形成期の卵と排卵後濾胞が認められる。

閉鎖期 (Spent stage: Spe) : 多くの卵黄卵で退行が始まっている。

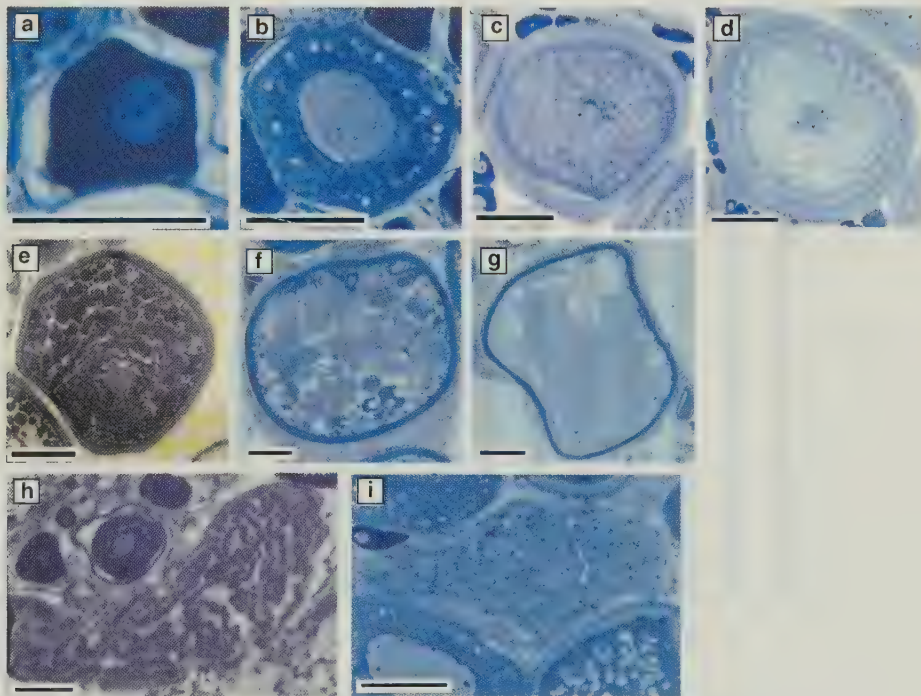


Fig. 9. Microphotographs of oocytes and postovulatory follicle at different stages in *Saurida umeyoshii*. a: perinucleolus stage, b: yolk vesicle stage, c: primary yolk stage, d: late yolk stage, e: early migratory nucleus stage, f: premature stage, g: mature stage, h: newly formed postovulatory follicle, i: degenerate postovulatory follicle. Toluidine blue stain. Bar = 200 μ m.

休止期 (Resting stage : R) : 退行後期の卵と無卵黄卵で構成される

生殖腺指数 (GSI) は次式により求めた。

$$GSI = (\text{生殖腺重量} / \text{内臓除去重量}) \times 100$$

予備的な測定の結果, 卵巣の部位による卵径組成や吸水卵の出現に差はなかった。各成熟段階の卵巣の卵径組成を調べるため, 10 %ホルマリンで固定した卵巣の左右中央部より切り出した組織から卵径150 μm 以上の卵, 計500粒について卵径を計測した。

尾叉長別成熟度の推定には6~9月に採集された個体の生殖腺組織像を用い, 雄では精小嚢内腔および輸精管内に多量の精子が認められる個体の出現率と尾叉長の関係, 雌では発達期後期, 成熟期および産卵期の卵巣を持つ個体の出現率と尾叉長の関係を求めた。

時間帯別の卵巣の成熟状況の観察には, 成熟期もしくは産卵期の卵巣を持つ標本のうち, 船上で採集したため正確な採集時間が特定できた以下に示す71個体を用いた。

1998年6月, 第1, 第2山田丸で採集: 7個体

1999年6~9月, 第1, 第2長運丸で採集: 9個体

1999年6~7月, 第21, 第22山田丸で採集: 55個体

バッチ産卵数の推定には成熟期の卵(吸水卵)を有する14個体(尾叉長278~421 mm)を用いた。これ

らの個体について, 10 %ホルマリンで固定した卵巣の左右中央部よりおよそ0.5 gの組織を切り出し, 万能投影機で吸水卵を計数した。計数した卵数から卵巣全体の吸水卵数を重量法で推定し, 尾叉長との関係を求めた。

結 果

1. 生殖年周期

1-1. 卵巣の各成熟段階の月別出現状況

最小成熟尾叉長以上(尾叉長別成熟度参照)の個体を成魚とみなし, 雌成魚の生殖年周期を調べた(Fig. 10)。発達期の卵巣は4~11月で出現した。成熟期あるいは産卵期の卵巣を持った個体は4~12月で認められ, 特に6~9月にかけて高い頻度で出現した。一方, 閉鎖期の卵巣は9月から, 休止期の卵巣は10月からそれぞれ出現し, 2~3月は全て未成熟期であった。

1-2. GSIの月別変化

雌雄のGSIの月別変化をFig. 11に示す。雌のGSIは6~9月にかけて平均8を越え, 8月には最大値を示した。雄では6月に最大値を示した。

2. 尾叉長別成熟度

雌雄のサイズ別成熟度をFig. 12に示す。雄の最小成熟尾叉長は180 mmであった。大型になるほど成熟

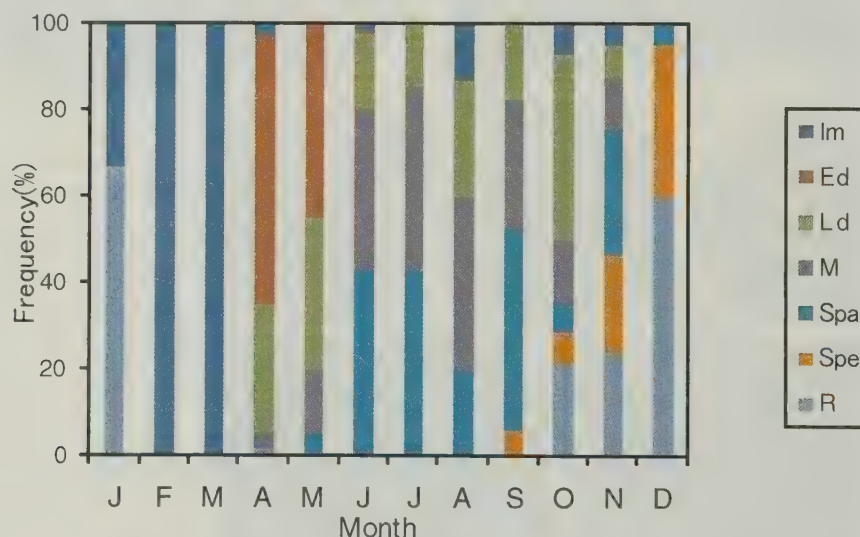


Fig. 10. Monthly changes in occurrence of various maturity stages of ovaries of *Saurida umeyoshii* in the East China Sea. Only specimens larger than the minimum size at sexual maturity (FL = 228 mm) were used for this analysis. Im: immature stage; Ed: early developing stage; Ld: Late developing stage; M: mature stage; Spa: spawning stage; Spe: spent stage; R: resting stage

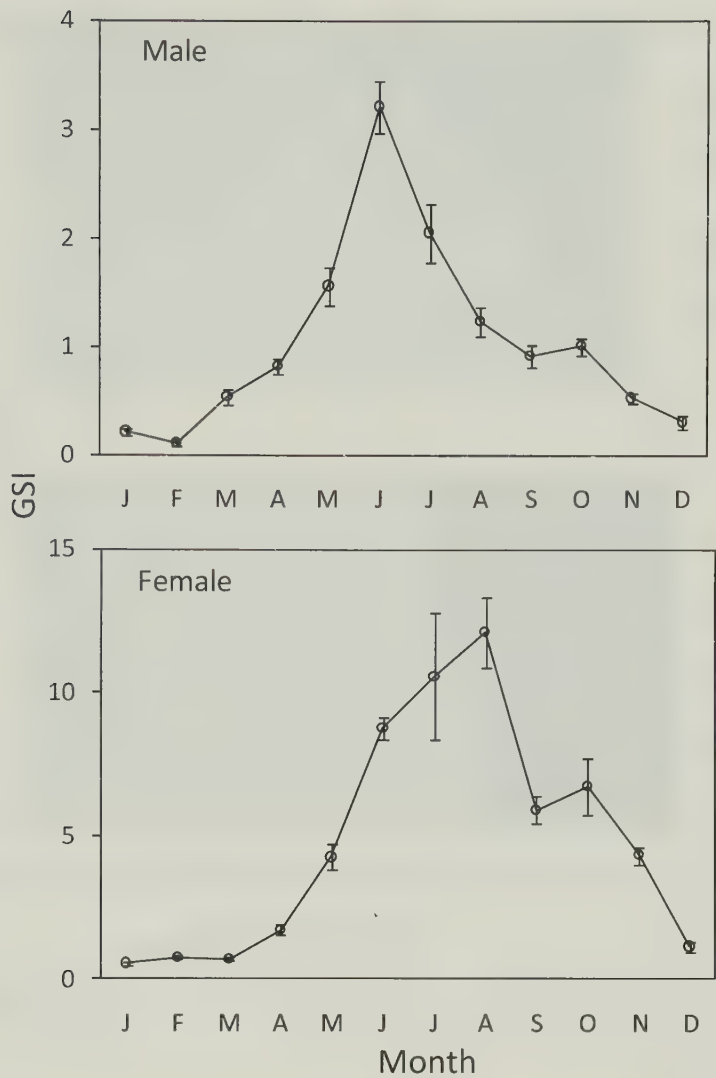


Fig. 11. Monthly changes in the mean gonadosomatic index (GSI) for male and female *Saurida umeyoshii*. Bar = SE.

個体の出現割合は上昇し、尾叉長272 mm以上の個体は全て成熟していた。雌では、尾叉長228 mm未満の個体は全て未成熟、それ以上の個体は全て成熟していた。また雌雄ともに2才以上ではほとんどの個体が成熟していた。

3. 卵の発達様式と最終成熟過程

3-1. 卵径組成

卵巣卵は卵径を増大させながら発達していき、最も

発達した卵が胚胞移動前期に達した時、卵径600~700 μm の卵黄形成後期と胚胞移動前期の卵で構成されるピークが形成された (Fig. 13.a)。成熟期では、卵径600~700 μm にみられたピークが小さくなり、吸水卵で構成される分離卵群が認められた (Fig. 13.b)。卵径600~700 μm の卵で構成されるピークは、吸水卵と排卵後濾胞を有する卵巣内ではさらに小さくなり (Fig. 13.c)、卵黄形成後期の卵と排卵後濾胞をもつ卵巣内では認められなくなった (Fig. 13.d)。

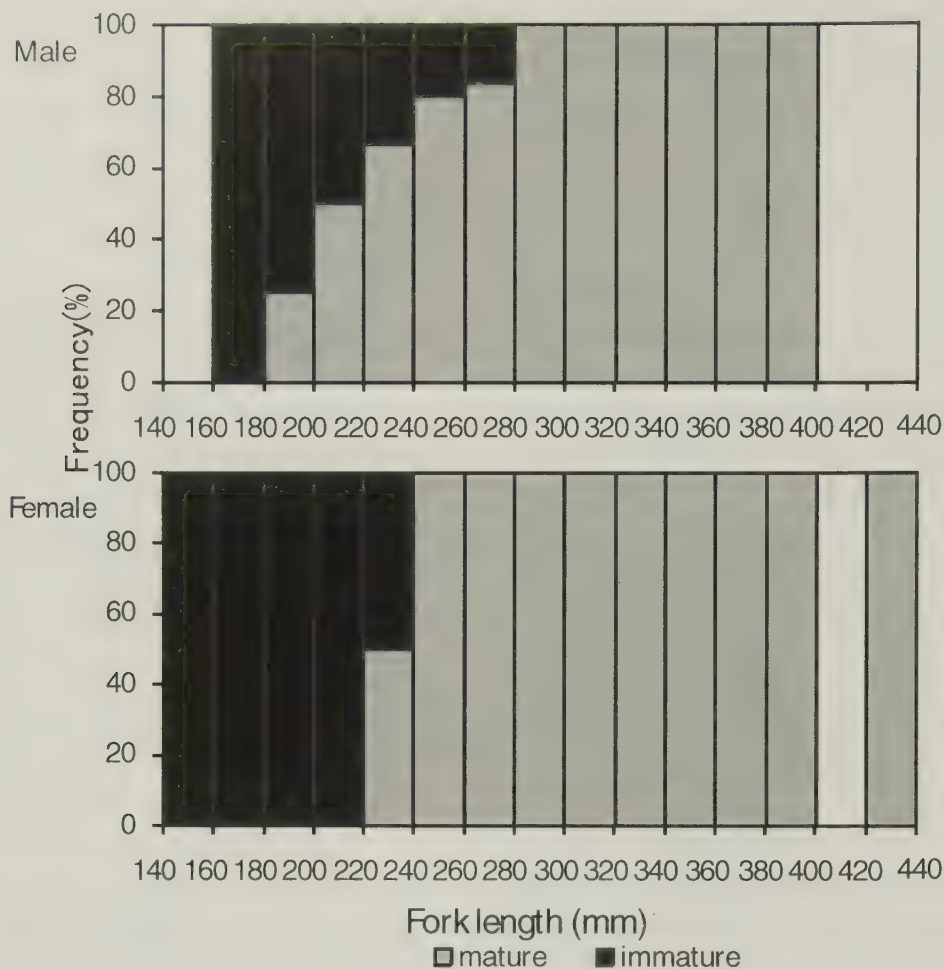


Fig. 12. Maturity by FL-class for male and female *Saurida umeyoshii* collected from June to September.

3-2. 卵の最終成熟過程

卵の最終成熟段階における時間帯別の卵の出現状況を Table 4に示す。20～4時では、卵巣内で最も発達段階の進んだ卵群（第1卵群）は胚胞移動後期の卵および成熟卵で構成され、第1卵群の次の発達段階にある卵群（第2卵群）は卵黄形成後期から胚胞移動前期の卵で構成されていた。4～12時では、第1卵群に吸水中の成熟卵、第2卵群に胚胞移動前期の卵がみられた。12～16時では、第1卵群は吸水を完了した卵径 $1,200\mu\text{m}$ 前後の卵であったのに対し、第2卵群は胚胞移動前から後期であった。16～20時では、第1卵群は吸水が完了した成熟卵で構成され、第2卵群は卵黄球融合中の胚胞移動後期に達していた。またこの時間

帯には、卵巣後縁付近に排卵卵が肉眼で観察される個体が出現した。排卵後濾胞は時間帯を問わず出現したが、特に16～20時では、顆粒膜細胞の壁および核が明瞭に観察され、複雑に褶曲した形状を呈した排卵後濾胞 (Fig. 9.h) を有する個体が認められた。

4. バッチ産卵数

バッチ産卵数は最大105,330粒（尾叉長374 mm）、最少8,490粒（尾叉長320 mm）であった。バッチ産卵数（BF粒）と尾叉長の関係は、

$$\text{BF} = (1.70 \times 10^{-8}) \text{FL}^{4.88} \quad (r^2 = 0.49)$$

で示された (Fig. 14)。

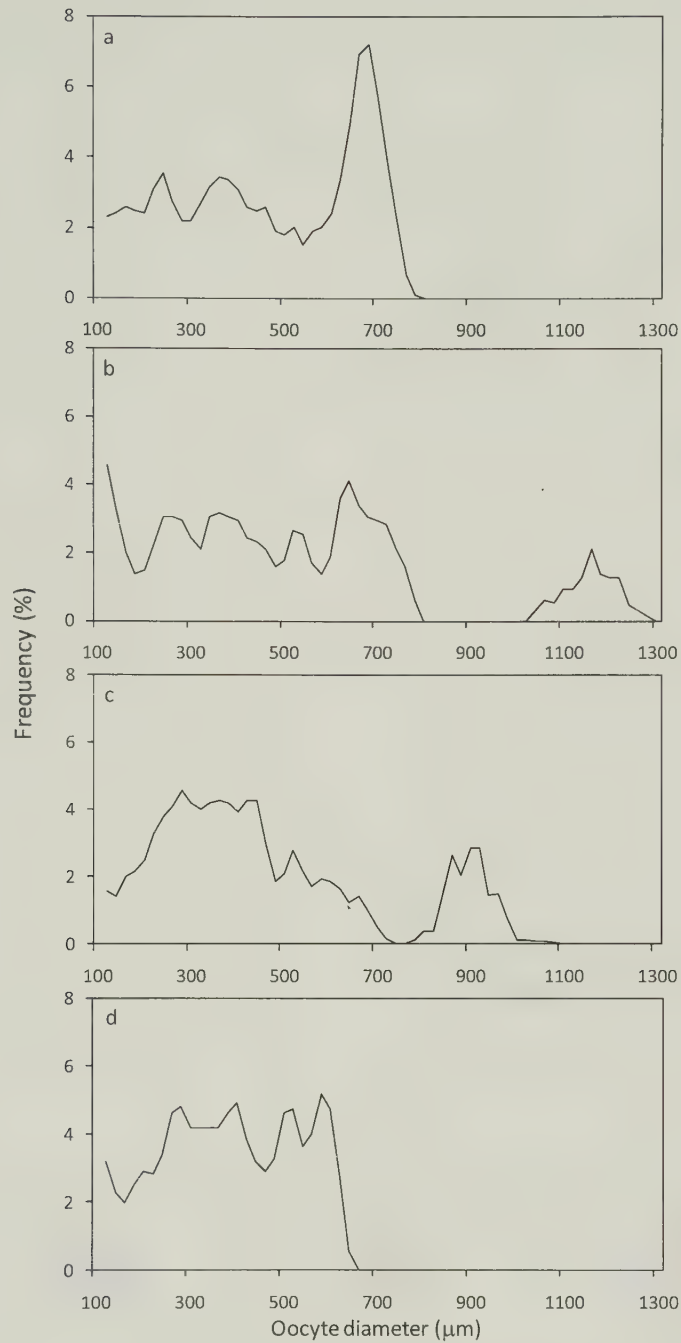


Fig. 13. Size-frequency distribution of oocytes ($\geq 150 \mu\text{m}$ diameter) in female *Saurida umeyoshii* ovaries around final maturation. a: mature stage ovary with early migratory nucleus stage oocytes as most developed oocytes, b: mature stage ovary with mature stage (hydration completed) oocytes as most developed oocytes, c: mature stage ovary with post-ovulatory follicles and mature stage (hydrating) oocytes as most developed oocytes, d: spawning stage ovary with post-ovulatory follicles and late yolk stage oocytes as most developed oocytes.

Table 4. Final oocyte maturation stages observed in female *Saurida umeyoshii* from the East China Sea having mature stage oocyte collected at different times of the day (LY = late yolk stage; EMN = early migratory nucleus stage; LMN = late migratory nucleus stage; M = mature stage; n: number of fish examined)

Sampling time (h)	n	Stage of oocyte development	
		Largest oocytes in ovary	Second largest oocytes in ovary
2000-0400	11	LMN - M	LY - EMN
0400-1200	11	M (hydrating)	EMN
1200-1600	28	M (hydration completed)	EMN - LMN
1600-2000	21	M (ovulation)	LMN

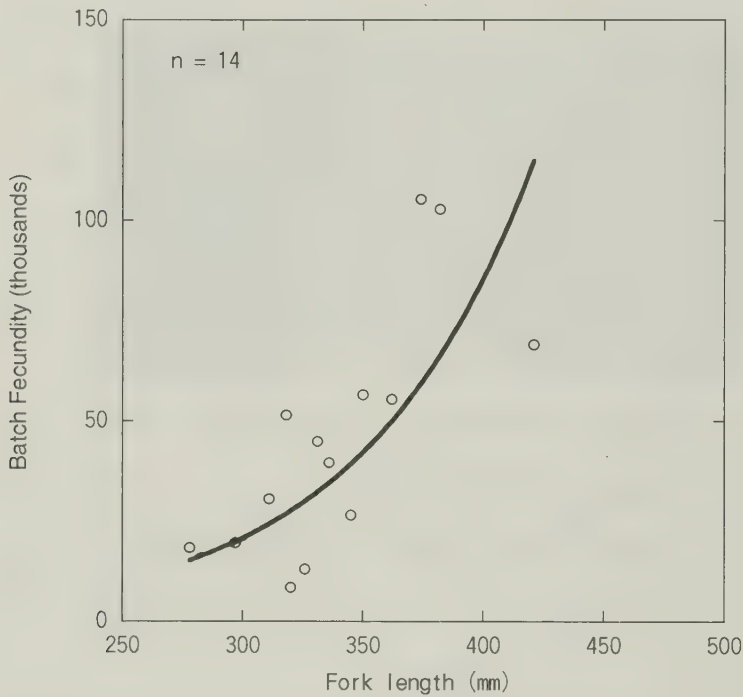


Fig. 14. Relationship between batch fecundity and fork length of female *Saurida umeyoshii*. n: number of fish examined.

考 察

本研究では組織学的観察に基づきクロエソの卵巢の成熟段階別月別出現状況を調べ、産卵期を明らかにした。またクロエソの成熟尾叉長およびバッチ産卵数の推定が行われた。卵巢の組織学的観察を行ったところ、2、3月は全ての個体が未成熟期の卵巢を持っていたが、4月にかけて急速に発達し、9割程度が発達期の卵巢を持つようになった。また4月にはわずかながら成熟期の卵巢を持つ個体も現れたため、産卵が開始されたと考えられる。5月にはより発達段階が進み、卵巢形成後期の卵を持つ個体が多く現れた。6、7月ではともに成熟期もしくは産卵期の卵巢を持つ個体が

8割程度を占めた。また8月には6割、9月には7割程度の個体が成熟期もしくは産卵期の卵巢を持っていた。このため、6～9月が産卵盛期にあたっているものと推察された。10月には産卵期もしくは成熟期の卵巢を持つ個体が2割程度出現したものの、閉鎖期および休止期の卵巢を持つ個体が3割程度現れ、産卵盛期は過ぎているものと考えられた。10月から休止期の卵巢を持つ個体が現れ、1月にかけて次第に増加した。このような、各発達段階の卵巢の月別出現状況から、クロエソの産卵期間は4月から12月の長期にわたり、その盛期は6月から9月であると考えられる。これはGSIの変化の状況ともほぼ一致した。また本研究では、GSIが5を上回る雌は概ね発達期後期、成熟期、もし

くは産卵期の卵巣を持っており、産卵に加入しているものと思われた。

卵径組成の変化および時間帯別卵巣の成熟状況から、本種では産卵直前に卵径600~700 μ mの卵黄形成後期から胚胞移動前期の卵で構成されるピークが形成され、そのピークからいくつかの分離卵群が形成されるという産卵様式を持つと考えられた。また、この一連の産卵が終わると、卵黄形成後期の卵が発達することによって再び卵径600~700 μ mのピークが形成され、同様に一連の産卵を繰り返すと考えられた。

排卵後濾胞の退行に伴う形態の変化は、北米カタクチイワシの産卵頻度の推定 (Hunter and Goldberg, 1980) に用いられて以降、マサバ (Dickerson *et al.*, 1992), 大西洋マサバ (Priede and Watson, 1993) など産卵頻度の指標として一般に用いられるようになった。排卵後濾胞の形態変化を検出することによって、Daily Egg Production Method (DEPM) で資源量の推定が可能となることが示されている (Lasker, 1989; 清水, 2006)。本種のように卵巣内に新旧の排卵後濾胞が同時に存在することは、その個体が産卵を短期間に繰り返すことを示している (Wright, 1992)。マダイ (Matsuyama *et al.*, 1988) やカツオ (Hunter *et al.*, 1986) では、排卵後濾胞は24時間以内に消失することが分かっている。また北米カタクチイワシでは3~4日で全て再吸収されるという (Hunter and Macewicz, 1989)。クロエソでは、新旧2つの消失段階にある排卵後濾胞が同時に観察されたことから、少なくとも24時間以上は排卵後濾胞が卵巣内に残ることが示唆された。

時間帯別卵巣の成熟状況を調べた結果、成熟期にある卵は、産卵日前日の早朝から夜にかけて卵黄形成後期、胚胞移動前期、胚胞移動後期と卵径を増大させながら順に発達していき、産卵日当日の早朝から午後にかけて吸水を行うものと考えられた (Fig. 15)。成熟卵の吸水は12~16時に得られた個体ではほぼ完了していた。16~20時には顆粒膜細胞の壁および核が明瞭で複雑に褶曲した形状を呈した、排卵後間もないと思われる排卵後濾胞 (Fig. 9.h) を有する個体が認められ、卵巣後縁付近に排卵卵が肉眼で観察される個体も出現した。また、20~4時に得られた個体の卵巣では吸水を完了した卵は観察されなかった。これらのことから、本種の排卵は16~20時に行われることが推察された。また排卵中の個体は第二卵群に胚胞移動後期の卵を持つことが多く、新しい排卵後濾胞と同時に吸収の進んだ排卵後濾胞 (Fig. 9.i) を持つ個体も観察されたことから、卵径組成の変化の結果と合わせて、少なくとも3日間連続で産卵する個体がいることが示唆された。この複数日にわたって連続する産卵が終わると、卵黄形成後期の卵が発達することによって再び卵径600~700 μ mのピークが形成され、同様の産卵を繰り返すと考えられた。以上のことから、本種の成熟、産卵様式は、非同期発達型 (高野, 1989) に属するものと推定された。

東シナ海産ワニエソでも、成熟卵、胚胞移動後期の卵と同時に排卵後濾胞が観察される卵巣や、新旧の排卵後濾胞が同時に観察される卵巣が出現している (山田, 1968)。このことは、クロエソと同様ワニエソにおいても複数日に渡って連続で産卵する個体がいるこ

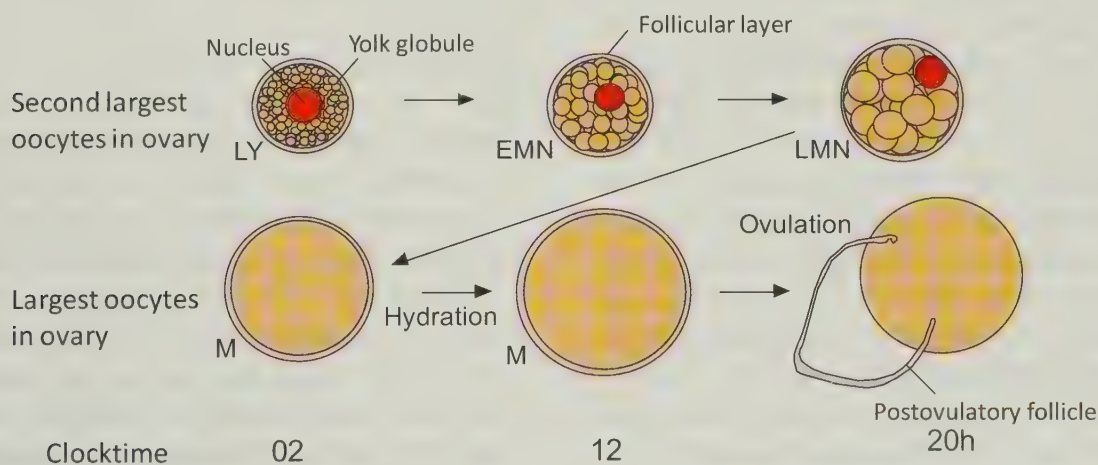


Fig. 15. Time course of final oocyte maturation of female *Saurida umeyoshii*. LY: late yolk stage; EMN: early migratory nucleus stage; LMN: late migratory nucleus stage; M: mature stage

とを示唆している。また本研究では、小型魚の割合が少ないため解析できなかったが、ワニエソでは初回産卵魚と思われる小型の個体には新旧の排卵後濾胞を同時に持つ卵巣が出現せず、小型魚は大型魚に比べ産卵回数が少ないことが考察されている（山田，1968）。

本種は多回産卵を行うことが明らかとなったが、多回産卵魚では年間産卵量が産卵期前に確定しておらず、産卵数を推定するにはバッチ産卵数と産卵回数が有用な情報となる（Hunter and Macewicz, 1989）。本研究では一回のバッチに尾叉長300 mmで約22,000粒、尾叉長400 mmで約83,000粒の卵が含まれると推定された。オーストラリア北西岸のフエダイ科 *Lutjanus vittus* は多回産卵魚で、産卵期の前半と後半でバッチ産卵数に差がないことが知られている（Davis and West, 1992）。一方、ドーバーソール *Microstomus pacificus* (see Hunter *et al.*, 1992) やマサバ（渡邊，2006）のバッチ産卵数は産卵期のはじめに多く、以降徐々に減少していく。カタクチイワシでは産卵期の盛期と終期でバッチ産卵数が異なり、またバッチ産卵数と水温、餌量、個体群密度の関係式が求められている（鶴田，2006）。本研究では成熟期の卵巣を無作為に選んで卵数を測定したが、本種の産卵様式を考え、排卵後濾胞の有無等を一つの指標として産卵回数に伴うバッチ産卵数の変化についても検討を行い、また水温等環境要因との関連を調べることにより、更に詳細な産卵生態の解明や年間産卵量の推定につながるものと考えられる。

またクロエソでは、産卵期が4月から12月の長期に渡ることが明らかとなった。我が国周辺海域のエソ類の産卵期に関しては、瀬戸内海東部のマエソで5～8月（多々良，1965）、瀬戸内海西部のマエソで6～9月（多々良，1965）、東シナ海産ワニエソで4月下旬から5、6月（山田，1968）、瀬戸内海産トカゲエソで5～9月（南海海区水産研究所，1972）、紀伊水道産トカゲエソで5～7月（高尾，1953）という知見がある。また東シナ海、黄海産のワニエソでは、3～5月を産卵期とするものと8、9月を産卵期とするもの、おそらく分布域の異なる2つの群があるという報告もある（岡田・久新，1955）。これらの研究に比べ、本研究ではクロエソの産卵はかなり長期に渡って行われることが明らかとなった（Table 5）。

種の違いにより産卵期に大きな差があることは充分考えられるが、産卵期が長期にわたる原因の一つにクロエソの分布する陸棚縁辺部の海洋環境が影響

していることが考えられる。東シナ海陸棚縁辺域では、本種に限らず、アカアマダイ、アンコウ、カイワリ、キダイも他の海域に比べ長い産卵期を持つが、東シナ海東部は周年にわたり黒潮系暖流の影響を強く受け海洋環境の変動が小さい（工藤，1985）ことが、長い産卵期の原因になっていることが考えられるという（米田・依田，2006）。*Saurida undosquamis* については地理的な違いによって産卵期が異なっており、アラビア海（Budnichenko and Dimitrova, 1981）、エジプト地中海沿岸（アレクサンドリア）（El-Greisy, 2005）、スエズ湾（Latif and Shenouda, 1973）、イルケンデルン湾（Ismen, 2003）での産卵は周年見られるが、紅海からスエズ運河経由でイスラエル地中海沿岸に帰化している個体群の産卵は水温の低下する冬期には行われず、産卵期は3～12月であると報告されている（Golani, 1993）。アラビア海（Budnichenko and Dimitrova, 1981）やマニラ湾（Tiewes *et al.*, 1972）では *Saurida tumbil* も周年産卵することが報告されている（ただしアラビア海からの *Saurida undosquamis* および *Saurida tumbil* の採集水深は他のマエソ属の分布水深と比較して著しく深く、種査定の見直しを要する）。また海洋環境だけではなく、餌環境が産卵期の長さに影響を与えることも分かっている（米田，2006）。さらに瀬戸内海の東西ではマエソの産卵期に違いがあることが報告されているが、両海域間では個体群密度が異なっており、摂餌生態にも相違が見られるという（多々良，1965）。海洋環境、個体群密度、餌料供給などが複合的に影響して産卵期の違いに表れているのかもしれない。

今回の研究で、初めて東シナ海産クロエソの成熟、産卵に関する詳細な情報が得られた。本種はかつてマエソと混同されていたため過去の成熟、産卵に関する知見がなく過去の本種の特性との比較はできないが、過去エソ類において詳細に検討されたことのない卵の発達過程や産卵時間等が明らかとなった。現在断片的にしか整備されていない他のエソ類についての生物学的諸特性についても、本研究のような手法を用いて詳細に調査し、明らかにしていくことが必要である。

また本種についても、今後資源量の増減に伴い生殖、成長などの特性が変化していくことは充分考えられる。こういった現象を捉えるためにも、本研究で明らかとなった成熟、産卵特性や、組織観察に基づく生殖腺の発達段階の規定等の情報が有用になろうと考えられる。

Table 5. Spawning season estimated for *Saurida* spp. from various localities by different authors

Species	Sampling Area	Spawning season	References
<i>S. umeyoshii</i>	East China Sea	Apr - Dec	Present study
<i>S. elongata</i>	Tsushima / Korea Strait	May - Aug	Present study
<i>S. elongata</i>	Kii Channel, Japan	May - Jul	Takao, 1953
	Yamaguchi Pref., Japan	May - Jul	Yatsuyanagi et al., 1953
	Yamaguchi Pref., Japan	May - Aug	Maekawa, 1961
	Seto Inland Sea, Japan	May - Sep	Nansei National Fisheries Research Institute, 1972
<i>S. wanieso</i>	East China Sea / Yellow Sea	Mar - May	Okada and Kyushin, 1955
	East China Sea / Yellow Sea	Aug - Sep	Okada and Kyushin, 1955
	East China Sea	Apr - Jun	Yamada, 1968
<i>S. macrolepis</i>	Yamaguchi Pref., Japan	Jul - Sep	Yatsuyanagi et al., 1953
	Eastern Seto Inland Sea, Japan	May - Aug	Tatara, 1965
	Western Seto Inland Sea, Japan	Jun - Sep	Tatara, 1965
<i>S. undosquamis</i>	Arabian Sea	year-round	Budnichenko and Dimitrova, 1981
	Gulf of Suez, Egypt	year-round	Latif and Shenouda, 1973
	Mediterranean coast, Israel	Mar - Dec	Golani, 1993
	Mediterranean coast, Egypt	year-round	El-Greisy, 2005
	Iskenderun Bay, Turkey	year-round	Ismen, 2003
<i>S. tumbil</i>	Taiwan Strait	Mar - Jul	Liu, 1959
	Manira Bay	year-round	Tiews et al., 1972
	Southern part of East China Sea	Mar - Jun	Liu and Yeh, 1974
	Taiwan Strait	Mar - Jun	Liu and Yeh, 1974
	Northern part of South China Sea	Feb - May	Liu and Yeh, 1974
	Gulf of Tonkin	Feb - May	Liu and Yeh, 1974
	Arabian Sea	year-round	Budnichenko and Dimitrova, 1981

第3章 対馬海峡周辺におけるトカゲエソの年齢と成長

目 的

トカゲエソは新潟県以南の日本周辺海域および朝鮮半島南部から東シナ海、南シナ海に広く分布するエソ科魚で、瀬戸内海ではエソ類の主部を占める（落合・田中, 1986）。我が国では主に練り製品の原料として利用され、重要な漁業資源として取り扱われている。本種は大部分が底曳網で漁獲され刺し網や釣りでも獲られている。他のエソ類と同様、本種についても近年資源の減少が著しく、近縁種のコウカイトカゲエソとともに漁獲量は減少していると考えられる（山田・時村, 1998；山田ら, 2007）。

トカゲエソの生物学的知見として、成長、産卵、分布などいくつかの報告がなされているが、過去のトカゲエソに関する知見についてはコウカイトカゲ

エソと混同して扱っていた可能性のあるものも存在する。このため、明らかにトカゲエソのみを扱ったものであると考えられる報告は乏しい。また、これまでの日本周辺海域産エソ類の年齢査定には鱗が年齢形質として用いられ、解析が行われてきた（高尾, 1953；多々良, 1953；岡田・久新, 1955；濱田, 1986）。しかしながら、鱗による年齢推定結果は北東太平洋産ギンダラ *Anoplopoma fimbria* (see Beamish and Chilton, 1982)、北米大陸東岸の *Cynoscion regalis* (see Lowerre-Barbieri et al., 1994) 等多くの魚種で、小型魚には第一標示が形成されないものがある、高齢魚は年輪の間隔が狭く読みとりが困難、偽輪が多い等の理由により信頼性に乏しいと報告されている。エソ類についても、*Saurida undosquamis* では年齢が高くなるほど鱗の輪紋数を過小評価する危険性が増加することが報告されている（Lee et al., 1986）。

年齢は、水産資源の解析において最も重要な項目の1つであり、(Summerfelt, 1987)、資源評価や資源管

理方策に大きな影響を持つ指標である（福島・渡邊，1990）。年齢形質の信頼性が高いことは年齢査定を行う上での前提条件であるが，エソ類の鱗に関して年齢形質としての信頼性が十分に検討されてきたとは言い難い。正確な年齢査定と成長解析には，信頼性の高い年齢形質の選定が不可欠である

本研究では，対馬近海におけるトカゲエソを用い，過去の鱗を用いた知見について検討するため，鱗と耳石について年齢形質としての妥当性を評価し，また耳石の観察に基づいて年齢と成長を調べた。

材料と方法

1999年5月から2001年6月に対馬周辺の海域から沖合底曳，小型底曳によって漁獲され，下関漁港，鐘崎漁港，津屋崎漁港に水揚げされたトカゲエソおよび，但州丸，熊本丸，第1・第2やまぐち丸の調査船調査で得られたトカゲエソ，計695個体を用いた（Table 6；Fig. 16）。

供試魚は，生鮮状態で，尾叉長（FL），体重，内臓除去重量（BW），生殖腺重量の測定を行った後，鱗と耳石（扁平石）をともに70 % エタノールで保存した。尾叉長は，体長測定板を用いて1 mm 単位で計測した。各重量の測定については，陸上ではデジタル重量計を用い，体重および内臓除去重量を1 g 単位，生殖腺重量を0.1 g 単位で測定した。船上では竿秤を用い，体

重，内臓除去重量および生殖腺重量を1 g 単位で測定した。鱗は，漁獲時に脱落しにくく，また再生鱗が少ないと思われる胸鰭基部付近から採取した。なお，椎体についても予備的に観察したところ，輪紋構造は観察されたものの，外縁部の輪紋が不明瞭で，また椎体径も同サイズの他魚種と比べ小さく，年齢形質としては不適であると判断した。

本種の鱗は櫛鱗で中央付近に起点があり，これを中心に隆起線が同心円状に観察され，放射状の溝（radii）で区切られていた（Fig. 17）。鱗の標示の読みとりには岡田・久新（1955）を参考にし，輪紋のはっきりと表れている鱗を用いた。鱗は水洗後スライドガラスに挟み，万能投影機で10倍に拡大して反射光で観察した（Fig. 17）。耳石はスライドガラス上でエポキシ樹脂に包埋し，1,000～2,000番の回転砥石で耳石の成長起点が明瞭になるまで矢状面を研磨し，断面を万能投影機で10倍に拡大して反射光下で観察した。

それぞれの年齢形質の妥当性を比較するため，2000年12月に得られた20個体について2人の読み手がそれぞれ数日おきに3回ずつの読みとりを行い，結果を比較した。読み取り精度の指標として，Average percent error（APE）（Beamish and Fournier, 1981）および The index of precision（D）（Chang, 1982）を求めた。

耳石の矢状断面には不透明帯と透明帯が交互に観察された（Fig. 18）。このため，標示を透明帯外縁と規

Table 6. Monthly number and fork length (FL) range of fishes examined for *Saurida elongata* from Tsushima/Korea Strait (n: number of fish examined)

Year	Month	Male		Female	
		n	FL (mm)	n	FL (mm)
1999	May	50	274 - 400	18	288 - 445
1999	Jun	3	189 - 244	13	251 - 374
1999	Jul	1	255	9	245 - 452
1999	Aug	1	307	7	285 - 446
1999	Sep	23	273 - 398	37	288 - 465
1999	Oct	9	281 - 388	36	288 - 478
1999	Nov	4	347 - 372	27	353 - 427
2000	Feb	10	313 - 364	36	316 - 437
2000	Mar	5	326 - 374	26	340 - 452
2000	Apr	8	328 - 366	29	310 - 440
2000	Jun	39	235 - 426	33	304 - 454
2000	Jul	55	288 - 378	13	338 - 466
2000	Aug	61	221 - 426	44	253 - 409
2000	Dec	5	347 - 387	24	323 - 430
2001	Jan	6	296 - 378	54	320 - 464
2001	Jun	2	268 - 295	7	261 - 462

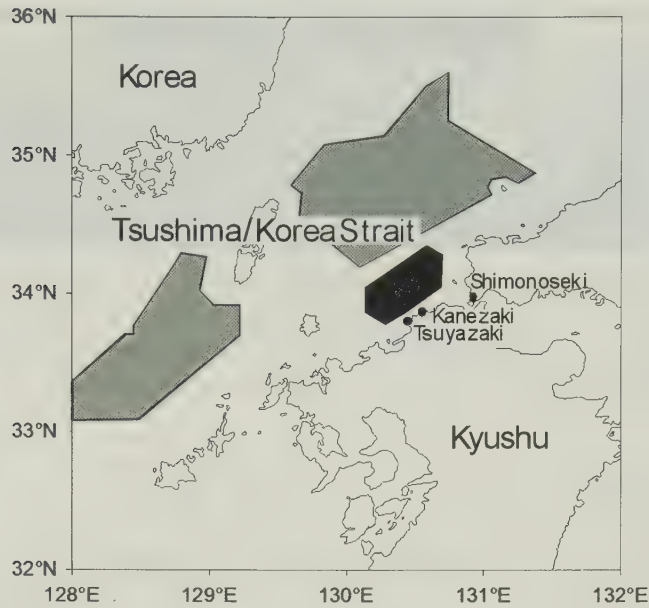


Fig. 16. Areas fished by offshore pair trawlers (light shading) and small trawlers (dark shading) for *Saurida elongata* in the Tsushima/Korea Strait, and locations of the fishing ports where specimens were obtained.

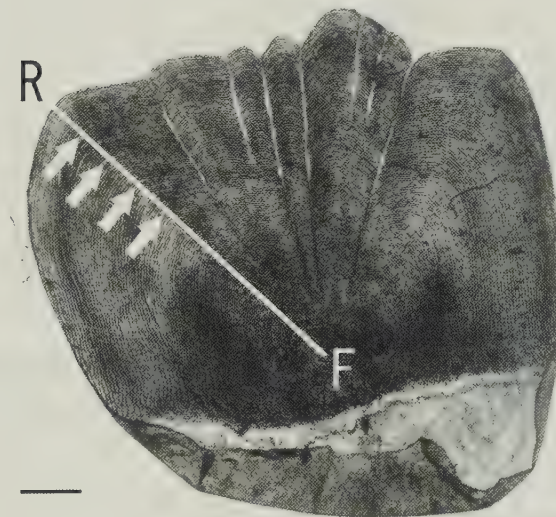


Fig. 17. Ring mark reading of scale from female *Saurida elongata* (323 mmFL) with four ring marks. Arrow indicates the ring mark. Bar = 1 mm (F, focus; R, scale radius).

定し、耳石の成長起点 (F) から耳石後端部までの直線の長さを耳石長 (R, mm), F から各標示までの長さを標示長 (r_n , mm) として標示の読みとりと測定を行った。なお、処理中に耳石が破損してしまった個体および標示の一部が不鮮明であった個体については年齢査定の解析から除外し、雄277個体、雌377個体を年

齢査定と成長解析に用いた。

耳石の標示形成時期は、耳石最外縁部における透明帯の月別出現状況と縁辺成長率 (MIR) の月別変化より判断した。縁辺成長率は次式により求めた。

$$\text{MIR} = (R - r_{\max}) / (r_{\max} - r_{\max-1})$$

$r_{\max}$; 最大標示の標示長 (mm),

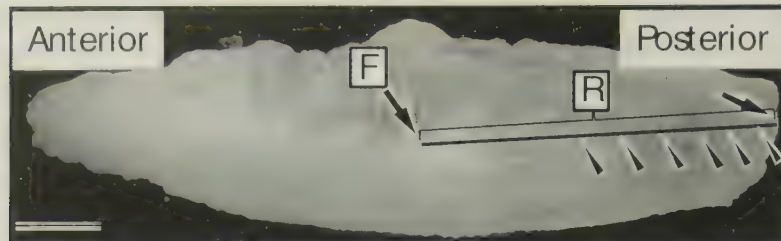


Fig. 18. Ring mark reading of otolith from female *Saurida elongata* (364 mmFL) with six ring marks. Arrow indicates the ring mark on the outer margin of the translucent band used for ring radius measurements. Bar = 1 mm (F, focus; R, otolith radius).

$r_{\max-1}$; 外から2番目の標示長 (mm)

各標示形成時の計算尾叉長は body proportional hypothesis (BPH) 法 (Francis, 1990) を用いて推定した。BPH 法による計算尾叉長は以下の式により求められる。

漁獲時の尾叉長と耳石長の関係式：

$$\ln FL_c = a + b \ln R \quad (1)$$

標示形成時の計算尾叉長と各標示長の関係式：

$$FL_n = (r_n / R)^b FL_c \quad (2)$$

FL_c ; 漁獲時の尾叉長 (mm), FL_n ; n 標示時の計算尾叉長 (mm), b ; (1)式の傾き

BPH 法で求められた各標示形成時の計算尾叉長をもとに von Bertalanffy の非線形成長モデルを用い、本種の成長を推定した。von Bertalanffy 成長式の推定には全計算尾叉長を用い、最小二乗法で当てはめを行った。計算には Kaleida Graph 4.0 (Synergy Software, USA) を用いた。

結 果

1. 年齢形質の妥当性の検証

20個体の鱗と耳石、二つの年齢形質の輪紋について2人の読み手が3回ずつ計6回読み取りを行った結果、鱗を用いた場合は、耳石に比べ著しく輪紋数が少なかった。読み取り精度の指標値 APE, D の平均値はともに耳石に比べ鱗で高く、耳石は鱗に比べ読みとり精度が高いことを示した (Table 7)。

2. 尾叉長組成

雄282個体、雌413個体の尾叉長を測定した結果、最小尾叉長は雄189 mm、雌235 mm、最大尾叉長は雄426 mm、雌478 mm、平均尾叉長は雄323.8 mm、雌371.9 mm であった。雌雄により尾叉長組成が異なり、雄では71 % の個体が尾叉長280~360 mm、雌では70 % の個体が尾叉長340~440 mm であった (Fig.

19)。

3. 標示形成時期

41個体 (6 %) の耳石は輪紋が明瞭でなく読み取りが困難であったため、成長解析の対象からは除外した。

耳石最外縁部に透明帯を持つ個体は6~9月には出現しなかったがその後急増し、11~2月に出現が集中した。12月には80 % 以上の個体で耳石外縁部が透明帯であった。3月には急減してその割合は10 % を下回り、4、5月にはほとんど見られなくなった (Fig. 20)。

縁辺成長率の平均は12月に最低で、月を追うごとに上昇して10月が最高となった (Fig. 21)。また、10~3月の標本で最外部の標示を除外して算出した縁辺成長率は、10月から連続して0.8を越える高い値を示した。これらの結果より、標示形成時期は12~3月と推定された。

4. 尾叉長と耳石長の関係

尾叉長と耳石長は雌雄ともに高い相関が認められ (Fig. 22), それらの関係式は次式により示された。

$$\text{雄: } \ln FL = 4.428 + 0.959 \ln R \quad (r^2 = 0.85, n = 279)$$

$$\text{雌: } \ln FL = 4.319 + 1.032 \ln R \quad (r^2 = 0.86, n = 379)$$

雌雄の関係式には傾き、切片ともに有意差が認められた (ANCOVA, $p < 0.01$)。

5. 計算尾叉長と成長式

標示の観察の結果、雄では最大11標示、雌では最大12標示まで認められた (Table 8)。トカゲエソの産卵盛期は6~7月である (4章、生殖年周期参照)。このため、本種の産卵盛期は標示形成時期 (11~2月) よりもおおよそ半年ほど前であると考えられる。したがって、平均計算尾叉長を、各標示数から0.5を減した

Table 7. Number of ring marks of scale and otolith read 3 times each by 2 readers and precision of age determination between readers using scales and otoliths of *Saurida elongata* (APE: the average percent error using the index; D: index of precision)

[illegible]

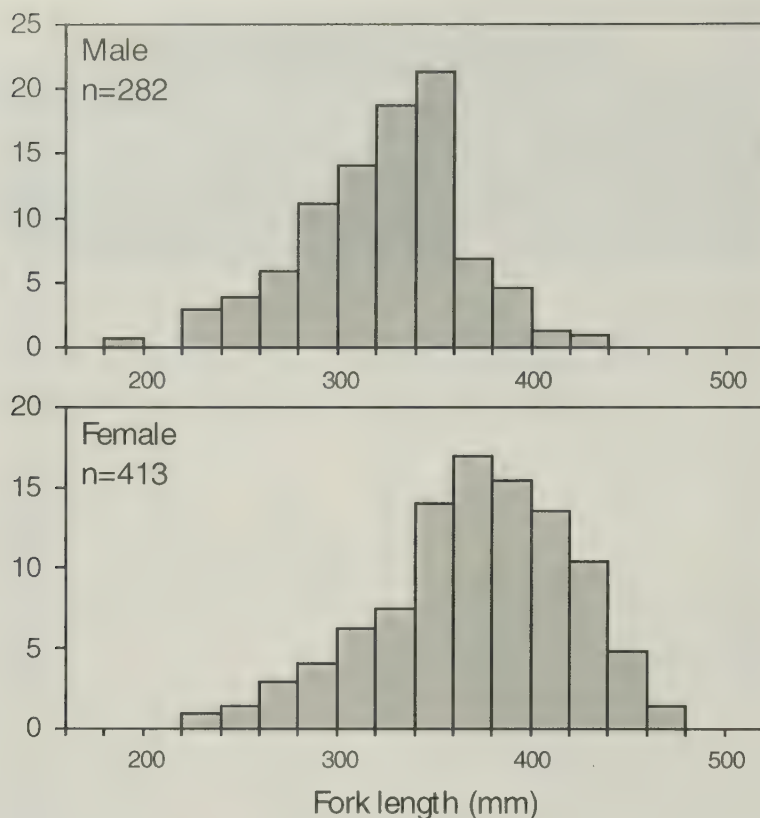


Fig. 19. Length-frequency distribution for male and female *Saurida elongata* sampled from Tsushima/Korea Strait. n: number of fish examined.

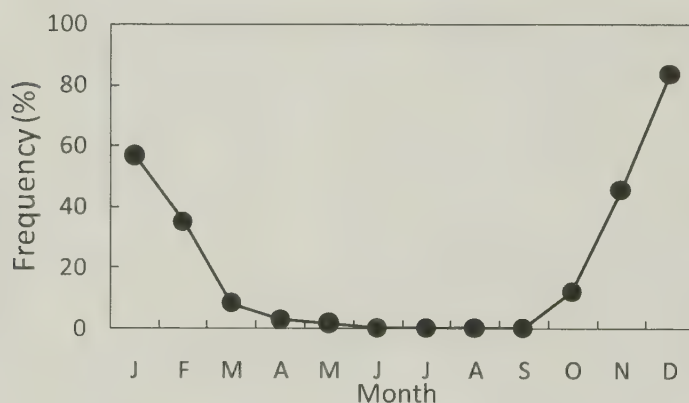


Fig. 20. Monthly changes in the frequency of appearance of a translucent band on the outer margin of the otolith of *Saurida elongata*.

年齢のものとみなし、雌雄別に成長式を推定した (Fig. 23)。

雌雄の成長式は次式により示された。

$$\text{雄: } FL_t = 422.3 (1 - e^{-0.202(t+1.30)}) \\ (1 \leq t \leq 10)$$

$$\text{雌: } FL_t = 512.6 (1 - e^{-0.157(t+1.45)}) \\ (1 \leq t \leq 11)$$

これらの成長推定結果より、雌は雄に比べ成長が良

いと考えられた。

6. 内臓除去体重と尾叉長の関係

内臓除去体重と尾叉長の関係は以下の式で表された。雌雄の関係式には有意差は認められなかった (F -test, $p < 0.01$) (Fig. 24)。

$$BW = 0.170 \times 10^{-4} FL^{2.89} (r^2 = 0.914, n = 695)$$

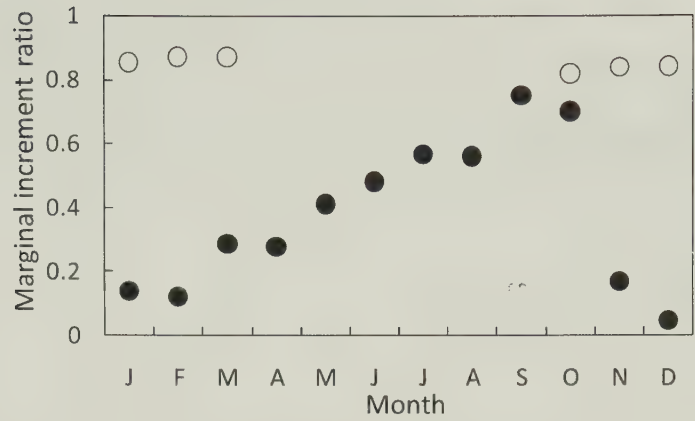


Fig. 21. Monthly changes in the mean marginal increment ratio of the otolith of *Saurida elongata* (closed circles). Open circles indicate the mean marginal increment ratio of otoliths without new opaque bands observed during the period between October and March.

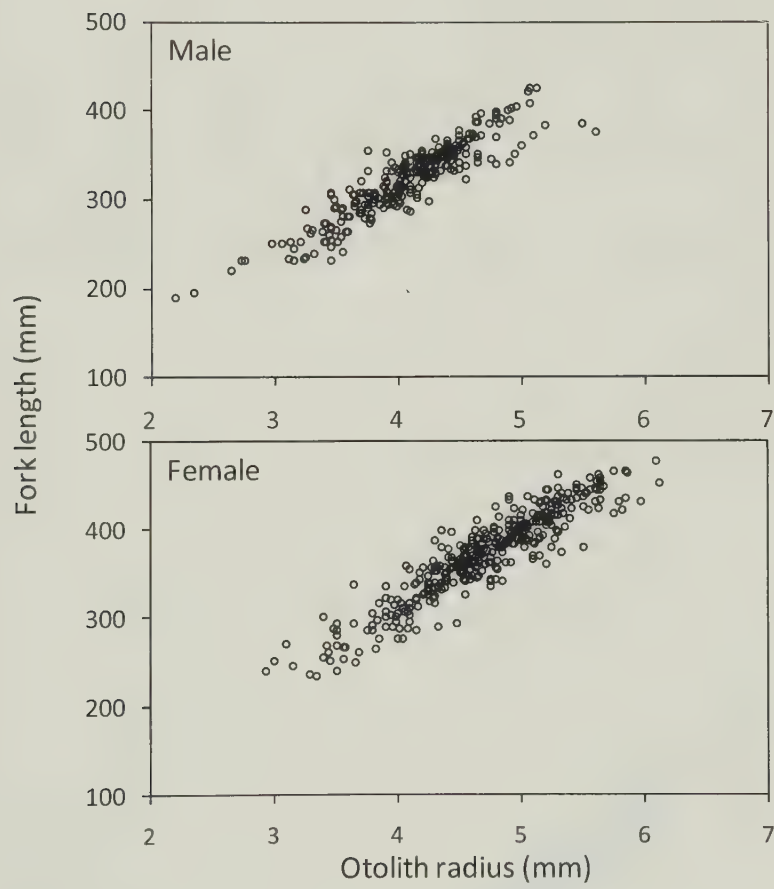


Fig. 22. Relationship between fork length and otolith radius for male and female *Saurida elongata*.

Table 8. Mean back-calculated fork lengths (FLi, mm) at each ring group for *Saurida elongata* (i, number of ring mark; n, number of fish examined)

Ring group	n	Back calculated length											
		FL ₁	FL ₂	FL ₃	FL ₄	FL ₅	FL ₆	FL ₇	FL ₈	FL ₉	FL ₁₀	FL ₁₁	FL ₁₂
Male													
1	0												
2	4	138.6	183.4										
3	22	130.8	183.3	228.1									
4	42	133.5	190.0	233.8	271.2								
5	64	130.0	185.5	228.1	265.9	297.0							
6	73	128.1	181.7	223.7	260.8	293.0	319.8						
7	44	127.3	176.1	217.9	254.8	288.5	316.4	338.9					
8	18	130.6	179.4	219.1	255.1	286.7	315.7	339.5	357.6				
9	6	116.5	160.8	203.5	237.5	267.9	295.3	316.3	334.2	349.3			
10	2	123.9	173.6	223.6	267.5	296.2	324.0	343.8	362.4	376.5	389.5		
11	2	116.6	170.8	206.3	243.9	275.5	302.3	325.5	343.2	356.2	368.1	381.3	
Mean (weighted)	277	129.4	182.3	224.8	261.8	291.9	317.1	337.0	351.9	356.1	378.8	381.3	
Female													
1	0												
2	3	147.1	210.1										
3	8	141.0	198.0	250.3									
4	41	137.8	196.2	246.7	285.0								
5	52	136.7	192.2	241.5	282.8	315.5							
6	86	135.1	190.6	236.9	277.2	312.5	344.2						
7	71	133.0	190.3	238.3	279.7	314.1	345.3	373.5					
8	49	133.4	183.9	230.2	269.2	304.9	336.3	364.2	388.4				
9	35	132.6	184.1	228.8	267.2	302.5	332.0	362.8	387.5	410.2			
10	22	136.3	184.0	226.7	267.0	297.9	327.5	358.8	383.7	404.1	421.3		
11	8	134.0	187.4	229.4	266.3	298.5	327.2	355.8	378.0	397.3	412.8	429.8	
12	2	145.3	180.4	215.5	247.2	283.2	312.6	335.9	365.6	383.9	401.6	412.4	420.2
Mean (weighted)	377	135.1	189.7	236.7	276.3	309.6	339.4	366.2	386.1	405.9	418.0	426.3	420.2

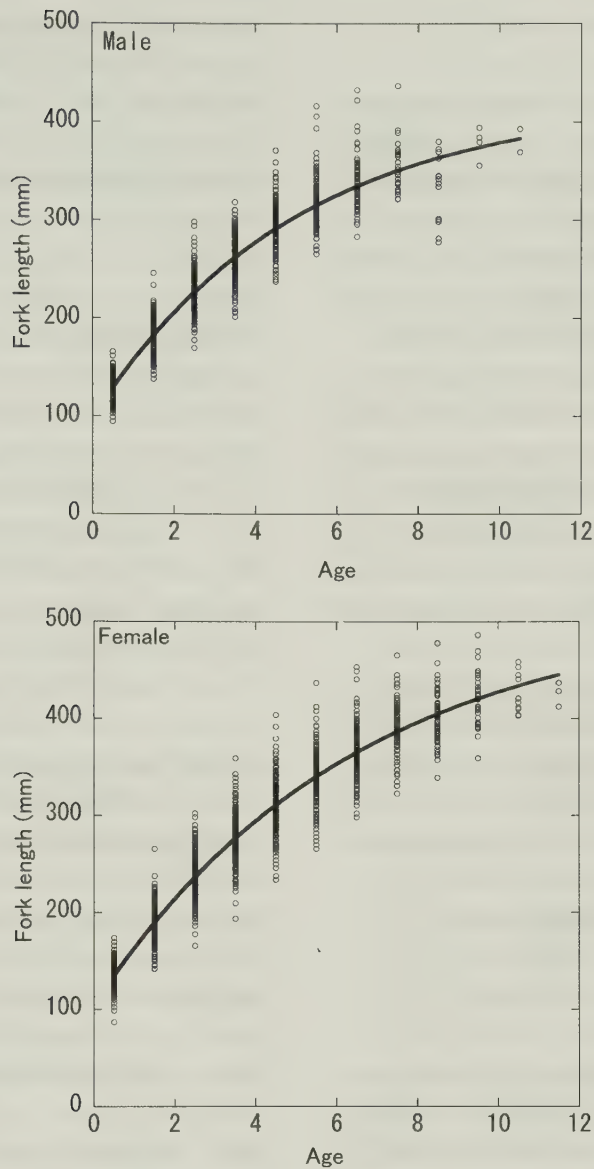


Fig. 23. von Bertalanffy growth curve for male and female *Saurida elongata*. Circles are the back-calculated fork length at ring formation.

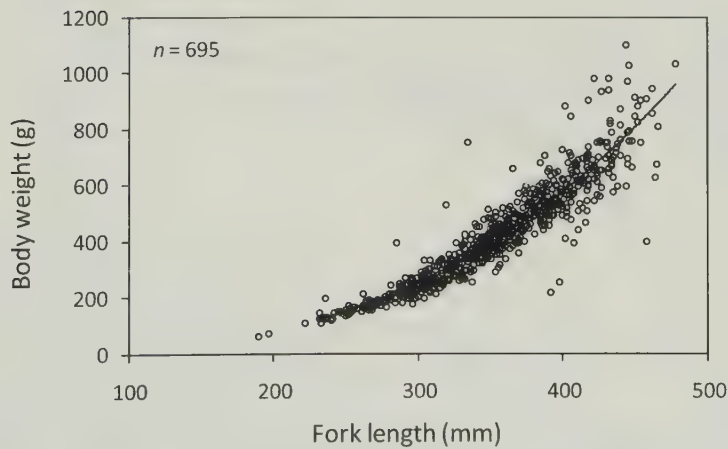


Fig. 24. Relationship between body weight and fork length for *Saurida elongata*. n: number of fish examined.

考 察

本研究ではまず、年齢形質として鱗を耳石とを比較した。トカゲエソの鱗は同一個体、同一部位から採集されたものでも個々の鱗によって標示の出現パターンが異なり、耳石に比べ年輪の決定が困難であった。このように採取した鱗によって標示の形成パターンが異なる現象は、ワニエソについても報告されている（岡田・久新，1955）。また鱗の輪紋の読みとり精度は、耳石に比較して低かった。さらに本研究では鱗から推定された年齢は耳石から推定された年齢より著しく低く、鱗を用いた場合は年齢を過小評価することが示唆された。後述するが、鱗での年齢査定は高齢魚の年齢を過小評価する可能性が高い等、年齢形質としての信頼性に欠けることが分かってきている。これらのことに基づき、本研究では年齢形質として耳石を選定し、成長解析に用いた。

透明帯の出現状況と縁辺成長率から、耳石の標示は年1回、11～2月に形成されると考えられた。耳石の輪紋は、水温、再生産、摂餌の季節的な違いが生理的活性に影響を与え、成長速度が周期的に変化することによって形成されると考えられている（Morales-Nin, 2000）。本研究で、トカゲエソの耳石の透明帯は、水温の低下する秋から冬にかけて形成されることが明らかとなった。一方不透明帯は、水温が高く産卵期（第4章参照）にあたる春から夏にかけて形成されていた。

雌雄の成長式を求めた結果から、他のエソ類と同様に、雌は雄に比べ成長が良いと考えられた。von Bertalanffy の成長曲線から推定される最大到達体長は雄で422.3 mm、雌で512.6 mm であった。また、

本研究では尾叉長400 mm以上の個体は全て雌であり、尾叉長組成からも、雌の方が大型になることが示唆された。トカゲエソの雌雄間には成長量や最大年齢に相違が認められたが、他のエソ類においても雌雄間に成長差や寿命の違いが報告されていることから、これらの相違はエソ類に共通の性的二型であると考えられた。

本研究でのトカゲエソの最高年齢は、雄で10歳、雌で11歳と推定されたが、過去の知見では、年齢形質として鱗を用いた紀伊水道のトカゲエソで雌雄ともに4歳（高尾，1953）であり、今回の年齢査定結果と比較すると著しく低い（Fig. 25）。また我が国南西水域のトカゲエソでは7歳までの尾叉長が推定されているが、成長は直線的で加齢に伴う成長の鈍化が見られず、本研究の成長解析の結果とは大きく異なる（横田，1956）（Table 9）。また山口県内海のトカゲエソは、10月に出現する0歳魚で全長6～12 cm、満1歳で14～17 cm、2歳魚では19～25 cm、3歳魚では24～31 cm、4歳魚では28～38 cmになるといい、本研究で推定された年齢別尾叉長は概ねこの体長範囲に収まるが、年齢査定方法は明確でない（前川，1961）。

魚類の年齢査定や成長解析には、一般的に椎体、鱗、耳石、棘条、鰓蓋骨等が年齢形質として用いられる（渡邊，1997）。このうち鱗は多くの魚種で古くから一般的に用いられていた年齢形質である（Suzuki and Kimura, 1990；菅野，1997）。鱗はリン酸カルシウム（ハイドロキシアパタイト）の結晶が沈着した組織で、体表の保護組織としてだけではなく、カルシウムやリンのリザーバーとして機能している（麦谷，1997）。鱗に沈着したカルシウム塩は代謝回転が活発

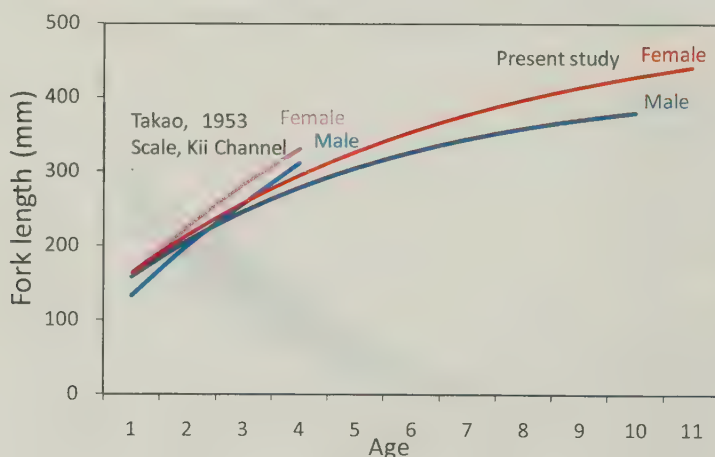


Fig. 25. Comparison on estimated growth in male and female *Saurida elongata* between Takao (1953) and present study

であるため、体液中のカルシウムやリンが不足すると容易に血液中に溶出することが知られており (Mugiya and Watabe, 1977; 山田・麦谷, 1988), 鱗は個体の成長を正確に記録していないことが考えられる。

また体成長が止まった高年齢魚では鱗の年輪が形成されなくなるため、年齢の過小評価につながる可能性がある。北米産 *Catostomus commersoni* や *Ophiodon elongates* において複数の年齢形質が比較された結果、成熟年齢以上の個体に対しては鱗を用いた年齢査定は信頼できないことが分かっている (Beamish, 1973; Beamish and Chilton, 1977)。さらに、鱗の脱落による再生鱗の出現も年齢査定の障害となっており、近年年齢形質としての鱗の有効性は疑問視されている (渡邊, 1997; Beamish and McFarlane, 1987)。また過小評価とは反対に、ニジマスにおいては偽輪形成による年齢の過大推定の危険性も指摘されている (Faragher, 1992)。このように、鱗は年齢形質としての信頼性に欠けることが分かっている。

エソ類についても鱗での年齢査定の信頼性については研究されており、Lee *et al.* (1986) は *Saurida undosquamis* の鱗と椎体とで出現輪紋数を比較し、年齢が高くなるほど鱗の輪紋数を過小評価する危険性が増加することを示している。Zhang and Xu (1987) は電子顕微鏡でワニエソの鱗を観察し、産卵期には鱗へのカルシウム沈着が減少し、これが年輪形成に関連することを示した。つまり、産卵期以外にも餌料供給の変化等により体内のカルシウムが減少すれば、鱗のカルシウム塩が再吸収されて輪紋が形成されることが考えられる。

耳石は炭酸カルシウムにより高度に石灰化した非細胞性の硬組織であり、鱗や骨に比べて代謝回転が極めて小さく、いったん形成された結晶構造が再吸収されることはない (麦谷, 1996)。また、体成長がほぼ停止しても、耳石の成長は継続することが知られている (Beamish and Chilton, 1982; 渡邊, 1997)。このため、耳石を用いた場合は体成長が停滞した高年齢魚においても鱗からは得られない正確な年齢査定が可能であり、耳石の年齢形質としての信頼性は高いと考えられている (麦谷, 1997)。

しかしながら、Budnichenko and Nor (1978) はアラビア海の *Saurida undosquamis* と *Saurida tumbil* において耳石と鱗の輪紋数を比較し、違いがないことを示している。しかしこの研究は耳石切片を作製せずそのまま観察しており、輪紋が充分観察できなかった可能性がある。また報告の中で、調査海域は熱帯に属しているため、環境変化による輪紋形成が起らず、再生産に関連する生理活性の変化によって輪紋形成

が起こると考察している (ただし Budnichenko and Dimitrova (1981) は、同海域の *Saurida undosquamis* と *Saurida tumbil* について産卵は周年行われることを報告している)。

本研究においても産卵期における生理的变化が耳石の輪紋形成の一つの要因となっていることは充分考えられる。トカゲエソの再生産について生理学的側面から研究した例はないが、瀬戸内海産トカゲエソについては産卵期にすり身の足 (ゲル形成能) が低下するとともに、50~60℃での戻り (蒲鉾の弾力劣化) が大きくなる現象が報告されている (Shimizu and Wendacoon, 1990)。このような現象の要因として筋肉 pH の変動が挙げられており (志水, 1984)、産卵期の生理的变化と関連していることが推察されるが、このような体質変化は耳石の年輪形成と関連している可能性がある。本研究ではクロエソ (第1章参照) に比べ、耳石外縁部に透明帯を持つ個体が狭い期間に集中して出現した。産卵期が輪紋形成に関連すると仮定すると、トカゲエソの産卵期がクロエソに比べ短い (第3, 4章参照) ことは、透明帯の出現が短期間に集中することを説明できる。また今回の研究のサンプルが得られた海域は、より低緯度にあたるアラビア海と比較すると水温の季節変動が大きいと考えられ、産卵のみでなく環境の季節変化も耳石の輪紋形成に関与していることが推察される。このことが低緯度水域のエソ類に比べより明瞭な耳石の年輪形成に関与しているかもしれない。

これまでの日本周辺海域産エソ科魚の年齢査定には、鱗が年齢形質として用いられてきたが (Table 9)、鱗を用いた研究における最大年齢は東シナ海産マエソ、ワニエソ、トカゲエソで4歳 (相川ら, 1949)、紀伊水道域のマエソで3歳 (多々良, 1953; 阪本, 1977)、瀬戸内海のマエソで4歳 (多々良, 1965)、紀伊水道のトカゲエソで4歳 (高尾, 1953)、東シナ海、黄海産ワニエソで6歳 (岡田・久新, 1955) で、これらは耳石を用いたトカゲエソ (本研究)、クロエソ (最大11歳, 第1章参照) および椎体を用いた台湾海峡産 *Saurida undosquamis* (最大10歳) (Lee *et al.*, 1986)、オーストラリア北西岸の *Saurida undosquamis* (最大9歳) (Wen *et al.*, 1987) の推定結果と比較して、いずれの種も成長が良く、短命であるとされている。この相違は、種や生息域の違いよりはむしろ、年齢形質の違いによる推定結果の相違であると考えられる。

過去、鱗から推定された年齢が高齢魚では過小評価されている可能性は高い。推定年齢が変更されれば、資源評価や資源管理方策に大きな影響が出る (福島・

Table 9. Growth estimated for *Saurida* spp. and the methods of age determination from various localities by different authors

Species	Sampling Area	Method	Sex of fish	Estimated fork length attained in mm at each age											References
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
<i>S. umeyoshii</i>	East China Sea	Otolith	Male	128	172	209	241	268	291	310	327				Present study
			Female	131	184	229	267	300	328	352	372	389	404		
<i>S. elongata</i>	Tsushima / Korea Strait	Otolith	Male	157	205	245	278	304	326	343	358	370	379		Present study
			Female	164	214	258	295	326	353	377	396	413	428	440	
<i>S. spp</i>	East China Sea	Scale	Unsexed	162	230	293	380								Aikawa et al., 1949
<i>S. elongata</i>	Kii Channel, Japan	Scale	Male	131	199	256	311								Takao, 1953
			Female	162	225	282	330								
	Southwest Japan	Scale	Unsexed	110	146	190	244	296	348	384					Yokota, 1956
			Unsexed	110	160	200	250	300	340	380					
<i>S. wanieso</i>	East China Sea / Yellow Sea	Scale	Male	152	266	362	430	474							Okada and Kyushin, 1955
			Female	152	273	378	462	524							
	East China Sea / Yellow Sea	Scale	Male	162	267	339	399	487							Okada and Kyushin, 1955
			Female	177	284	364	457	534	522						
	East China Sea	Scale	Male	120	223	292									Hamada, 1986
			Female	128	259	358	433								
<i>S. macrolepis</i>	Kii Channel, Japan	Scale	Male	106	171										Tatara, 1953
			Female	106	195	255									
	Southwest Japan	Scale	Unsexed	100	160	210	270	340	400	450	500				Yokota, 1956
	Seto Inland Sea, Japan	Scale	Male	180	230	290									
			Female	200	250	310									Tatara, 1965
<i>S. undosquamis</i>	Arabian Sea	Scale	Unsexed	161	238	302	350								Budnichenko and Nor, 1978
			Male	140	192	235	271	301	325	345					
	Taiwan Strait	Vertebra	Female	127	180	229	272	312	347	380	409	435	459		Lee et al., 1986
			Male	122	176	223	264	301	334	363	389				
	Northwest shelf of Australia	Vertebra	Female	111	168	218	262	301	336	366	393	417			Wen et al., 1987
			Male	136	195	241	276	303	324						
	Southern Taiwan Strait	Scale	Male	147	204	256	302	344	382	415	446				Lee and Yeh, 1989
			Female	147	204	256	302	344	382	415	446				
<i>S. tumbil</i>	Taiwan Strait	Scale	Male	147	215	293	348								Tung and Lien, 1965
			Female	149	239	325	412	475							
	Arabian Sea	Scale	Unsexed	176	270	340	391	434							Budnichenko and Nor, 1978
	East China Sea	Scale	Male	157	210	257	300	338	370						
			Female	166	220	276	324	366	403	435					Yeh et al., 1977
	Gulf of Tonkin	Scale	Male	169	216	256	299	334	376	402					
			Female	173	225	284	327	373	419	447					Yeh et al., 1977
	Bay of Bengal, India	Length frequency	Unsexed	254	393	472	517	542							
			Male	147	180	211	239	264	287						Rao, 1984
	Southern East China Sea	Length frequency	Female	154	191	226	257	286	313	338					
			Unsexed	123	184	238	285	326	362	394	422				Tzeng et al., 2002
	Mumbai, India	Length frequency	Unsexed	313	464	537	572	589	600						
			Unsexed	313	464	537	572	589	600						Jaiswar et al., 2003

渡邊, 1990)。従って本研究のように、今後他のエソ類についても鱗以外の年齢形質を用いて年齢や成長を再検討していくことが必要であると考えられる。

第4章 対馬海峡周辺におけるトカゲエソの成熟と産卵

目 的

トカゲエソの東シナ海域における漁獲量は、他の底魚類と同様大幅に減少しており、その資源状態は相当低位にあるものと考えられる。対馬海峡の我が国EEZ内についてもその資源量は低位にあると考えられ、2そう曳き沖合底曳網漁業によるエソ類の水揚げも減少しており、2006年のエソ類銘柄合計の水揚げ量は、1976年の水揚げ量のおよそ9%であった。このため、トカゲエソについても資源の評価と回復が強く求

められている。

魚類は、その種の資源量の変動によって生物学的、生態学的変化が見られることが知られている。トカゲエソと同属であるワニエソについても資源量の変化に伴う生殖生態の変化が報告されており、資源の減少に伴って成熟体長の小型化や、同一体長における卵巣重量の増大などが明らかとなっている（山田ら, 1965; 山田, 1968）。このワニエソの生殖生態の変化は、サイズ組成、資源量、餌環境の変化に対応した補償作用によるものと考えられている（山田ら, 1965）が、近年、漁獲圧が個体群の遺伝子組成を変化させていることが他の種で指摘されており（Jørgensen *et al.*, 2007）、ワニエソについても東シナ海周辺国からの高い漁獲圧により、遺伝的作用による生物学的、生態学的変化が起こった可能性が考えられる。トカゲエソについても資源量変動に伴う成熟、産卵特性が変化することが予想されるが、これらの変化を捉えるにはまず詳細な生

物学的情報の整備が不可欠である。前述のように、従来トカゲエソ類には分類学的な混乱があり、今回扱ったトカゲエソはコウカイトカゲエソと同種であるとみなされてきた。このことも災いし、水産重要種にも関わらず、資源生物学的諸特性に関する情報は不足していた。

過去の我が国周辺のトカゲエソの生殖に関する知見はわずかで、瀬戸内海産（南西海区水産研究所, 1972）と紀伊水道産（高尾, 1953）の産卵期の推定、および瀬戸内海産の産卵数推定（瀬戸内海水産開発協議会, 1989）以外、整理された情報は乏しい。また産卵期の推定は生殖腺重量や生殖腺指数の変化から推定したものであり、組織学的観察に基づいて生殖年周期を推定した研究は過去行われていない。

本研究では、組織学的観察により卵巣の成熟段階を規定し、これに基づいてトカゲエソの卵巣の月別出現状況、成熟尾叉長およびバッチ産卵数の推定を行い、トカゲエソの資源の評価や管理を行うために必要な成熟、産卵特性に関する情報を詳細に明らかにすることを目的とした。

材料と方法

3章と同様、1999年5月から2001年6月に対馬周辺海域で漁獲されたトカゲエソ、計695個体を用いた。供試魚は、生鮮状態で、尾叉長（FL）、体重、内臓除去重量（BW）、生殖腺重量の測定を行った。尾叉長は、体長測定板を用いて1 mm 単位で計測した。各重量の測定については、陸上ではデジタル重量計を用い、体重および内臓除去重量を1 g 単位、生殖腺重量を0.1 g

単位で測定した。船上では竿秤を用い、体重、内臓除去重量および生殖腺重量を1 g 単位で測定した。

組織標本作製用に、摘出した生殖腺をブアン氏液で固定した。また産卵期の一部の個体の卵巣を10 %ホルマリン液で固定し、卵数算定用に20個体の卵巣を用いた。ブアン氏液で固定した生殖腺の中央部を切り出し、エタノールで脱水後メタクリル樹脂（Technovit7100, Kulzer）で包埋した。滑走式マイクロトームで2.5 μm の樹脂切片を作製し、1 %トルイジンブルーで染色後、光学顕微鏡で観察し組織観察を行った。Yamamoto (1956) を参考に、本種の卵の発達段階を区分し（Fig. 26）、組織学的観察に基づいて卵巣の成熟段階を次の6期に区分した。

未成熟期 (Immature stage: Im) : 周辺仁期 (Perinucleolus stage)、卵黄胞期 (Yolk vesicle stage) の卵のみで構成される。

発達期 (Developing stage) : 最も発達した卵が卵黄形成前期 (Primary yolk stage) (小型の卵黄球が細胞質の周辺部に認められる) もしくは卵黄形成後期 (Late yolk stage) (大型の卵黄球が細胞質全域に認められる) に達している。この期については、卵黄の蓄積状況により前期 (Early developing stage: Ed) と後期 (Late developing stage: Ld) に区別した。

成熟期 (Mature stage: M) : 最も発達した卵が胚胎移動期 (Migratory nucleus stage)、もしくは成熟期 (Mature stage) に達している。

産卵期 (Spawning stage: Spa) : 卵黄形成期の卵と排卵後濾胞が認められる。

閉鎖期 (Spent stage: Spe) : 多くの卵黄卵で退

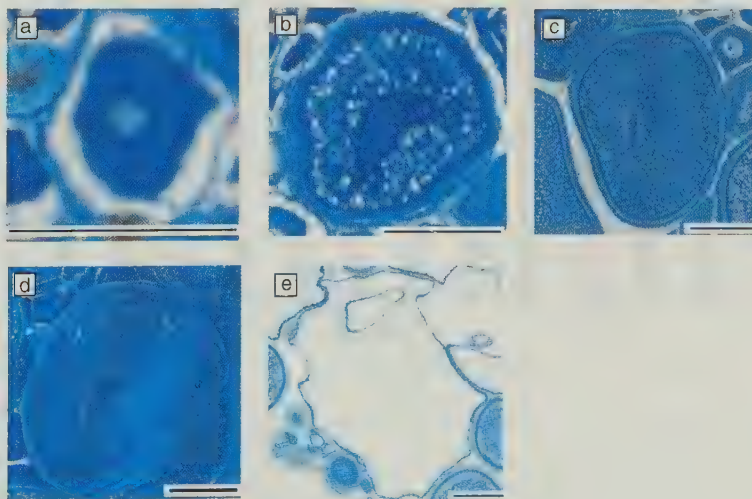


Fig. 26. Microphotographs of oocytes at different stages in *Saurida elongata*. a: perinucleolus stage, b: yolk vesicle stage, c: primary yolk stage, d: late yolk stage, e: mature stage. Toluidine blue stain. Bar = 200 μm .

行が始まっている

休止期 (Resting stage : R) : 退行後期の卵と無卵黄卵で構成される。

生殖腺指数 (GSI) は次式により求めた。

$$GSI = (\text{生殖腺重量} / \text{内臓除去重量}) \times 100$$

尾叉長別成熟度の推定には5～8月に採集された雄212個体、雌144個体の生殖腺組織像を用い、雄では精小嚢内腔および輸精管内に多量の精子が認められる個体の出現率と尾叉長の関係、雌では発達期後期、成熟期および産卵期の卵巣を持つ個体の出現率と尾叉長の関係を求めた。

バッチ産卵数の推定には成熟期の卵 (吸水卵) を有する20個体 (尾叉長261～445 mm) を用いた。予備的な測定の結果卵巣の部位による吸水卵の出現に差はなかったため、これらの個体について10 %ホルマリンで固定した卵巣の左右中央部よりおよそ0.5 gの組織を切り出し、万能投影機で吸水卵を計数した。計数した卵数から卵巣全体の吸水卵数を重量法で推定し、尾叉長との関係を求めた。

結 果

1. 生殖年周期

1-1. 卵巣の各成熟段階の月別出現状況

最小成熟尾叉長以上 (尾叉長別成熟率参照) の個体

について、卵巣の組織学的観察に基づき、生殖年周期を調べた (Fig. 27)。

発達期前期の卵巣は2～4月に多く出現した。発達期後期、成熟期の卵巣は4～8月で出現した。産卵期の卵巣は5～8月で認められた。一方、閉鎖期の卵巣は7～9月に主に出現した。休止期の卵巣は10月をピークとして8～12月に出現した。未成熟期の卵巣は8月に出現し、徐々に増加して12、1月にはほぼ全てが未成熟期であった。

1-2. GSI の月別変化

雌雄のGSIの月別変化をFig. 28に示す。雌のGSIは5～7月にかけて平均6を越え、5月には最大値を示した。雄でも5月に最大値を示した。

2. 尾叉長別成熟率

雌雄の尾叉長別成熟度をFig. 29に示す。雄では尾叉長221～240 mmで22 %, 241～260 mmで92 %が成熟個体であった。雄の最小成熟尾叉長は235 mmで、250 mm以上の個体は全て成熟していた。雌では尾叉長241～260 mmで50 %, 261～280 mmで67 %の個体が成熟していた。雌の最小成熟尾叉長は249 mmで、280 mm以上の個体は全て成熟していた。また雌雄ともに3才以上でほとんどの個体が成熟していた。

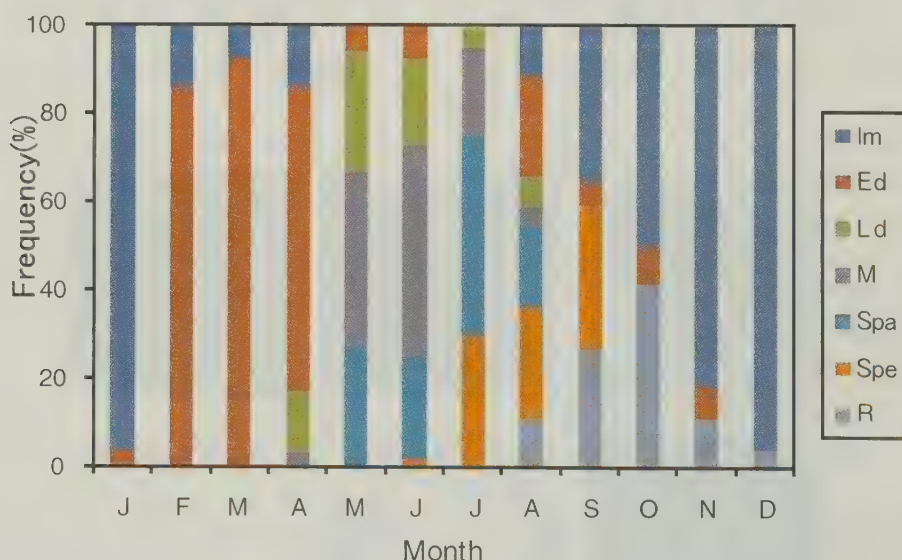


Fig. 27. Monthly changes in occurrence of various maturity stages of ovaries of *Saurida elongata* in the Tsushima/Korea Strait. Only specimens larger than the minimum size at sexual maturity (FL = 249 mm) were used for this analysis. Im: immature stage; Ed: early developing stage; Ld: Late developing stage; M: mature stage; Spa: spawning stage; Spe: spent stage; R: resting stage

3. バッチ産卵数

バッチ産卵数は最大177,130粒（尾叉長444 mm）、
最少25,771粒（尾叉長261 mm）であった（Fig. 30）。

バッチ産卵数（BF 粒）と尾叉長の関係は、

$$BF = 0.00161FL^{2.98} \quad (r^2 = 0.73)$$

で示された。

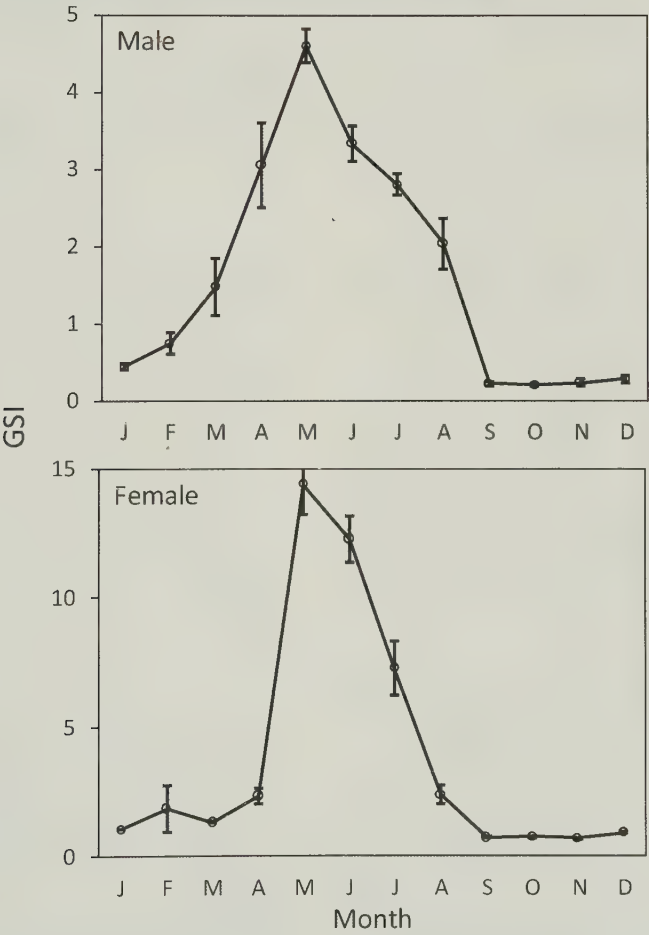


Fig. 28. Monthly changes in the mean gonadosomatic index (GSI) for male and female *Saurida elongata*. Bar = SE.

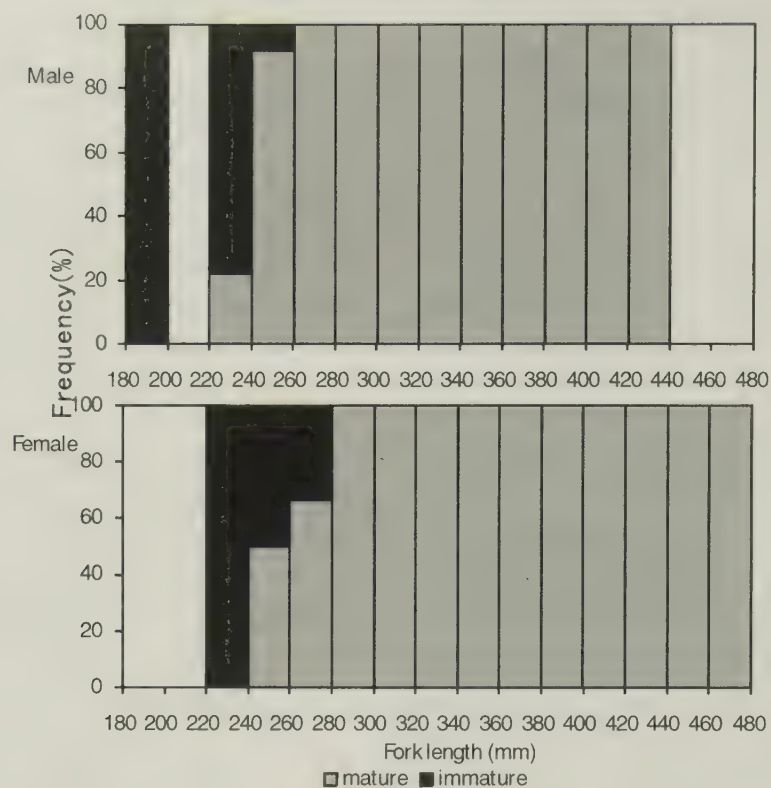


Fig. 29. Maturity by FL-class for male and female *Saurida elongata* collected from May to August.

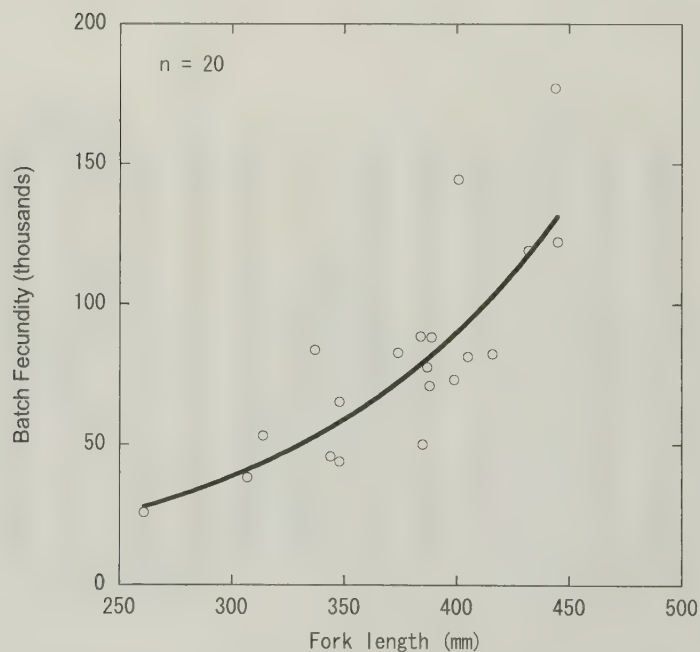


Fig. 30. Relationship between batch fecundity and fork length of female *Saurida elongata*. n: number of fish examined.

考 察

瀬戸内海産トカゲエソの産卵期は、GSIが上昇する5～9月で、その盛期は6～7月と推定されている(南西海区水産研究所, 1972)。また山口県内海での産卵期は5月中旬から8月中旬(前川, 1961)、紀伊水道のトカゲエソについては生殖腺重量の増加から、5～7月と推定されている(高尾, 1953)(Table 5)。しかしこれまで、組織学的観察から本種の生殖年周期を詳細に検討した報告はなかった。

本研究では組織学的観察により卵巣の成熟段階が規定され、それに基づいてトカゲエソの産卵期、成熟尾叉長およびバッチ産卵数の推定が行われた。卵巣の組織学的観察を行ったところ、12、1月はほぼ全ての個体が未成熟期の卵巣を持っていたが、2、3月にかけて卵巣は次第に発達し、発達期前期に達することが分かった。4月からは成熟期の卵巣を持つ個体が出現したため、産卵が開始されたと考えられる。5、6月には、産卵期もしくは成熟期の卵巣を持つ個体が7割程度を占め、この期間が産卵盛期にあたっていると推察された。7月には産卵期もしくは成熟期の卵巣を持つ個体が多く出現したものの閉鎖期の卵巣を持つ個体が3割程度現れ、産卵盛期は過ぎていたものと考えられた。8月からは休止期の卵巣を持つ個体が現れ、その割合は10月にかけて次第に増加した。また8月には未成熟期の卵巣を持つ個体が再び現れ、その割合は12月にかけて増加した。このような、各発達段階の卵巣の月別出現状況から、トカゲエソの産卵期間は5月から8月にわたり、その盛期は5月から6月であると考えられた。これはGSIの変化の状況ともほぼ一致した。またこの結果は、瀬戸内海産、山口県内海産、および紀伊水道産のトカゲエソについて従来推定されていた産卵期とも概ね一致する。また本研究では、GSIが5を上回る雌は概ね発達期後期、成熟期、もしくは産卵期の卵巣を持っており、産卵に加入しているものと思われた。

さらに、産卵期の卵巣の組織学的観察によると、排卵後濾胞と同時に成熟卵、胚胞移動期の卵を持つ個体も頻繁に出現したため、本種は1産卵期に複数回産卵するものと考えられた。排卵後濾胞の形態の詳細な観察や時間帯別の卵巣の状態の観察には、船上で得られる新鮮な個体から卵巣を除去し、直ちに固定することが望ましい。しかし本種が多く漁獲される対馬海峡周辺の沖合底曳網漁業は5月中旬から8月中旬までが休漁で、これは本種の産卵期にあたる。このため沖合底曳網漁船に乗船して得られた供試魚のうち産卵中と思われる個体はわずかで、卵巣の時間帯別発達状況の観

察や産卵時間の特定はできなかった。

バッチ産卵数は尾叉長300 mmで約19,000粒、尾叉長400 mmで約69,000粒と推定された。過去、本種の産卵数は29,000～138,000粒と推定されている(瀬戸内海水産開発協議会, 1989)が、体長等との関係は不明であった。バッチ産卵数はDaily Egg Production Method (DEPM)で資源量の直接推定を可能とするために必要となる、資源生物学的に重要な指標である(Hunter and Macewicz, 1989)。年間産卵量を推定するにはバッチ産卵数に加えて産卵回数の値が必要とされるため、今後排卵後濾胞の消長過程や卵の発達様式について明らかにし、産卵頻度を求めることが、本種の資源管理を行うにあたり有用となろう。

再生産能力が資源量の変動によって変化することがマイワシ(森本, 1998)やカタクチイワシ(鶴田・高橋, 1997; 銭谷・木村, 1997; Funamoto and Aoki, 2002)等で報告されている。一般に、競合個体の減少によって餌環境が改善すると、成長が良くなるとともに再生産への投資も増加する(Heino and Kaitala, 1999)。この結果、卵数の増加、卵黄蓄積の増加に伴う卵径の増大、産卵期の長期化などが起こると考えられている(Rijnsdorp, 1993)。東シナ海、黄海の底魚資源に関してもこのような現象が多数報告されており、ハモの成熟年齢の低下(三尾ら, 1975)、キグチの成熟年齢の低下(三尾ら, 1975)、アカアマダイの産卵期の長期化(築山・多部田, 1997)、ウマヅラハギの成熟体長の小型化(杉浦・多部田, 1998)、キダイ同年齢群の小型化および成熟年齢の低下(Okamoto and Tabeta, 1998)、コウライマナガツオ同年齢群の小型化(Buoyら, 1998)、タチウオの群成熟率の上昇(山田, 1971; 呉・多部田, 1995)および産卵数の増加(山田, 1971)等が明らかとなっている。トカゲエソと同属のワニエソでは、資源量減少に伴って最小成熟体長が小さくなり、卵巣重量や抱卵数が増加したことが報告されている(山田ら, 1965; 山田, 1968)。

これまで、こういった現象はサイズ組成、資源量、餌料供給量の変化に対応した補償作用によるものであると考えられてきた。しかし近年、資源量の減少に伴う生殖生態の変化は、補償作用のみならず個体群の遺伝組成の変化にも起因することが指摘されるようになってきた(Olsen *et al.*, 2004; Yoneda and Wright, 2004; Jørgensen *et al.*, 2007)。これに基づくと、ワニエソの最小成熟体長の小型化、卵巣重量や抱卵数の増加は、成長により多くのエネルギー投資を行う個体に比べ、再生産に多く偏ったエネルギーを投下する個体の遺伝形質が選択的に残ったために起こったと考えられることもできる。ワニエソに関して成長の変化や栄養

状態に関しての知見は不足しており、ワニエソの生殖特性の変化の要因を特定することは困難であるが、トカゲエソについても同様に生物特性の変化が起こっていることは充分考えられ、個体群の遺伝的な変化が起こっている可能性もある

個体群の生殖特性の変化が一時的な環境変化に起因する場合は、環境が元に戻れば生殖特性も元に戻ると考えられる。しかし、ある遺伝形質を持つ個体の選択的な漁獲により個体群の遺伝子組成が変化してしまった場合、個体群の持っていた繁殖特性の多様性は失われる可能性がある。このような多様性を失った個体群は環境変動に対して脆弱になっていると考えられており、また資源としてみると回復力を失っていることも考えられる (Olsen *et al.*, 2004)。メイン湾とジョージバンクの大西洋マダラ (Barot *et al.*, 2002), North Sea plaice (Grift *et al.*, 2003), Northeast Arctic cod (Heino *et al.*, 2002) および Newfoundland American plaice (Barot *et al.*, 2005) などでは、乱獲によって一時は資源が壊滅状態に陥った。その後厳しい資源管理により漁獲圧は軽減したが、これらの資源は遺伝的要因による生殖生態の変化を起こしてしまっており、生殖特性は元の状態に戻ってはいないという。このことが、漁業管理が行われているにも関わらず資源が回復しない一つの要因となっているのではないかと考えられている (Olsen *et al.*, 2004)。

本研究で扱ったトカゲエソに関しては、過去の知見の不足のため、現段階で資源量の増減による生物特性の変化について検討することはできないが、今後の資源量変化によって本種の成長や生殖に関する特性が変化することは充分考えられる。資源を高度に評価、管理していくには、こういった生態変化を捉え、その原因の検討も可能とするような生物情報のモニタリング体制の構築が必要であり、継続して成長や成熟特性に関する情報を蓄積することが必要である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、終始懇切に御指導下さった九州大学大学院農学研究院動物資源科学部門海洋生物学分野の松山倫也教授、本論文をご校閲頂いた同分野の竹田達右准教授、同水産増殖学分野の望岡典隆准教授に心より謝意を表する。また御指導および標本の採集、測定に御協力を賜った独立行政法人水産総合研究センター中央水産研究所の米田道夫博士に心より感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり、貴重な御助言ならびに標本採集の御協力をいただいた独立行政法人水産総合

研究センター中央水産研究所資源評価部の堀川博史博士、同センター西海区水産研究所東シナ海漁業資源部の時村宗春博士、塚本洋一博士、依田真里氏、同センター開発調査センターの越智洋介博士に厚く御礼申し上げます。エソ類の形態、分類等について貴重な御助言を賜り、文献の収集にご協力頂いた、元水産庁西海区水産研究所の山田梅芳氏に心から感謝の意を表する。標本の採集、測定にあたっては財団法人下関海洋科学アカデミーの杵山由貴子氏に御助力頂いた。津屋崎漁港および鐘崎漁港での標本採集には、九州大学大学院生物資源環境科学府附属水産実験所の故七田康治技官とそのご家族にご支援を頂いた。ここに記して謝意を表する。

また船上での標本採集に快く御協力下さった海邦丸、熊本丸、但州丸、陽光丸、さらに山田水産株式会社、長運水産株式会社の尾崎武広氏、同社所有の第1、第2、第21、第22山田丸、第1、第2長運丸の乗組員の皆様、山口県以東機船底曳網漁業協同組合と第1、第2やまぐち丸の清島漁労長、玉城船長をはじめ乗組員の皆様に深甚なる謝意を表す。

標本の採集・測定にあたっては九州大学大学院農学研究動物資源科学部門海洋生物学研究室の学生諸氏に御協力頂いた。ここに改めて御礼申し上げます。

なお、本研究に用いた標本には、平成10、11年度日本周辺陸棚資源緊急調査（水産庁）および旧海洋水産資源開発センター（現独立行政法人水産総合研究センター開発調査センター）の実施した新漁業生産システム構築実証化事業において漁獲され、提供されたものを含む。

参考文献

- 相川広秋, 入江春彦, 大津留健, 多々良薫, 1949: 底曳網魚種二・三の年令に就いて, 「東海黄海底魚資源調査研究誌」(水産庁福岡駐在所, 水産研究会福岡分室編), 1, 109-115.
- Barot S., Heino M., O'Brien L., and Dieckmann U., 2002: Reaction norms for age and size at maturation: study of the long term trend (1970-1998) for Georges Bank and Gulf of Maine cod stocks. *ICES CM.*, Y, 03.
- Barot S., Heino M., Morgan M. J., and Dieckmann U., 2005: Maturation of Newfoundland American plaice (*Hippoglossoides platessoides*): long-term trends in maturation reaction norms despite low fishing mortality? *ICES J. Mar. Sci.*, **62**, 56-64.
- Beamish R. J., 1973: Determination of age and

- growth of population of the white sucker (*Catostomus commersoni*) exhibiting a wide range in size at maturity. *J. Fish. Res. Board Can.*, **30**, 607-616.
- Beamish R. J. and Chilton D. E., 1977: Age determination of lingcod (*Ophiodon elongatus*) using dorsal fin rays and scales. *J. Fish. Res. Board Can.*, **34**, 1305-1313.
- Beamish R. J. and Fournier D. A., 1981: A method for comparing the precision of a set of age determinations. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **38**, 982-983.
- Beamish R. J. and Chilton D. E. 1982: Preliminary evaluation of a method to determine the age of sablefish (*Anoplopoma fimbria*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **39**, 277-287.
- Beamish R. J. and McFarlane G. A., 1983: The forgotten requirement for age validation in fisheries biology. *T. Am. Fish. Soc.*, **112**, 735-743.
- Beamish R. J. and McFarlane G. A., 1987: Current trends in age determination methodology, in "Age and growth of fish" (eds. by Summerfelt R. C. and Hall G. E.), Iowa State University Press, Iowa, pp. 15-42.
- Budnichenko V. A. and Nor L. A., 1978: Some features of the growth of *Saurida undosquamis* and *S. tumbil* (Pisces, Synodontidae) in the Arabian Sea. *J. Ichtyol.*, **18**, 750-755.
- Budnichenko V. A. and Dimitrova O. S., 1981: The reproductive biology of *Saurida undosquamis* and *Saurida tumbil* (Family Synodontidae) in the Arabian Sea. *J. Ichtyol.*, **19**, 80-86.
- Buoy R, 原高志, 多部田修, 1998: 東シナ海産コウライマナガツオの年齢と成長. 平成9年度シェアードストック管理調査委託事業報告書. 水産庁, 東京, 115-126.
- Carlander K. D., 1987: A history of scale age and growth studies of North American freshwater fish, in "Age and growth of Fish" (eds. by Summerfelt R. C. and Hall G. E.), Iowa State University Press, Iowa, pp. 3-14.
- Chang W.Y.B., 1982: A statistical method for evaluating the reproducibility of age determinations. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **39**, 1208-1210.
- Davis T. L. O. and West G. J., 1992: Growth and mortality of *Lutjanus vittus* (Quoy and Gaimard) from the North West Shelf of Australia. *Fish. Bull.*, **90**, 395-404.
- Dickerson T. L., Macewicz B. J., and Hunter J. R., 1992: Spawning frequency and batch fecundity of chub mackerel, *Scomber japonicas*, during 1985. *Cal. Coop. Ocean. Fish. Invest. Rep.*, **33**, 130-140.
- El-Greisy Z. A., 2005: Reproductive biology and histology of female brushtooth lizardfish *Saurida undosquamis* (Richardson), family: Sunodontidae, from the Mediterranean coast of Egypt. *Egypt. J. Aquat. Res.*, **31**, 367-386.
- Faragher R. A., 1992: Growth and age validation of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum), in Lake Eucumbene, NSW. *Aust. J. Mar. Freshwater Res.*, **43**, 1033-1042.
- Francis R. I. C. C., 1990: Back-calculation of fish length: a critical review. *J. Fish Biol.*, **36**, 883-902.
- 福島信一, 渡邊良朗, 1990: 北西大西洋におけるサンマの季節別発生群と大型魚・中型魚・小型魚との対応. 東北水研研報, **52**, 17-27.
- Funamoto T. and Aoki I., 2002: Reproductive biology of Japanese anchovy off the Pacific coast of eastern Honshu, Japan. *J. Fish Biol.*, **60**, 154-169.
- Golani D., 1993: The biology of the Red Sea migrant, *Saurida undosquamis* in the Mediterranean and comparison with the indigenous confamilial *Synodus sarus* (Teleostei: Synodontidae). *Hydrobiologia*, **271**, 109-117.
- Grift R. E., Rijnsdorp A. D., Barot S., Heino M., and Dieckmann U., 2003: Fisheries-induced trends in reaction norms for maturation in North Sea plaice. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **257**, 247-257.
- 濱田律子, 1986: 東シナ海産ワニエソの年齢と成長. 西水研研報, **63**, 49-59.
- 花淵信夫, 1971: 対馬近海におけるトカゲエソの漁業生物学的研究 - I. 分布および形態変異について. 西水研研報, **39**, 65-87.
- Hayashi T., Yamaguchi Y., and Hanaoka T., 1960: Preliminary report on diurnal feeding activities of genus *Saurida*. *Records of Oceanographic Works in Japan*, special number **4**, 151-158.
- Heino M. and Kaitala V., 1999: Evolution of resource allocation between growth and reproduction

- in animals with indeterminate growth. *J. Evol. Biol.*, **12**, 423-429.
- Heino M., Dieckmann U., and Godø O. R., 2002: Reaction norm analysis of fisheries-induced adaptive change and the case of the Northeast Arctic cod. *ICES CM*, Y, 14.
- 堀川博史, 山田梅芳, 1999: 東シナ海および黄海における底魚類の生物特性の変化. 月刊海洋, **31**, 631-636.
- Hunter J. R. and Goldberg S. R., 1980: Spawning incidence and. batch fecundity in northern anchovy, *Engraulis mordax*. *Fish. Bull. U.S.*, **77**, 641-652.
- Hunter J. R. and Macewicz B. J., 1989: 多回産卵魚における産卵頻度の算定, 「総産卵量による浮魚類の資源量推定法」(Lasker R. 編, 渡邊良朗, 辻 祥子訳), 東北区水産研究所, 仙台, pp. 147-178.
- Hunter J. R., Macewicz B. J., and Sibert J. R., 1986: The spawning frequency of skipjack tuna *Katsuwonus pelamis*, from the South Pacific. *Fish. Bull.*, **84**, 895-903.
- Hunter J. R., Macewicz B. J., Lo N. C. H., and Kimbrell C. A., 1992: Fecundity, spawning, and maturity of female Dover sole *Microstomus pacificus*, with an evaluation of assumptions and precision. *Fish. Bull.*, **90**, 101-128.
- Inoue T. and Nakabo T., 2006: The *Saurida undosquamis* group (Aulopiformes: Synodontidae), with description of a new species from southern Japan. *Ichthyol. Res.*, **53**, 379-397.
- Ismen A., 2003: Maturity and fecundity of lizardfish (*Saurida undosquamis* Richardson, 1848) in Iskenderun Bay, (Eastern Mediterranean). *Turk. J. Zool.*, **27**, 231-238.
- Jaiswar A. K., Chakraborty S. K., Prasad R. R., Palaniswamy R., and Bommireddy S., 2003: Population dynamics of lizard fish *Saurida tumbil* (Teleostomi/Synodontidae) from Mumbai, west coast of India. *Indian J. Mar. Sci.*, **32**, 147-150.
- Jones C. M., 1992: Development and application of the otolith increment technique, in "Otolith microstructure examination and analysis" (eds. by D. K. Stevenson and S. E. Campana), Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, **117**, 1-11.
- Jørgensen C., Enberg K., Dunlop E. S., Arlinghaus R., Boukal D. S., Brander K., Ernande B., Gårdmark A., Johnston F., Matsumura S., Pardoe H., Raab K., Silva A., Vainikka A., Dieckmann U., Heino M., and Rijnsdorp A. D., 2007: Ecology: managing evolving fish stocks. *Science*, **318**, 1247-1248.
- 近藤正人, 1985: 東シナ海・黄海漁場の漁況に関する研究 - I. 50m 深および底層における平均水温・塩分の分布, 西水研研報, **62**, 19-66.
- 工藤晋二, 通山正弘, 1963: マエソ *Saurida undosquamis* の食性について. 南海区水研研報, **19**, 1-17.
- Lasker R. (編), 1989: 総産卵量による浮魚類の資源量推定法. (渡邊良朗, 辻 祥子訳), 東北区水産研究所, 仙台
- Latif A. F. A. and Shenouda T. S., 1973: Studies on *Saurida undosquamis* (Richardson) from the Gulf of Suez. *Bull. Inst. Oceanogr. Fish., Egypt.*, **3**, 295-335.
- Lee Y.C. and Yen S.Y., 1989: Age determination by using scale ring-reading for the lizard fish, *Saurida undosquamis*, from the southern part of the Taiwan Strait. *Acta Oceanogr. Taiwan.*, **23**, 63-73.
- Lee Y.C., Yeh S.Y., and Liu H.C., 1986: Age and growth of lizard fish, *Saurida undosquamis*, in the southern part of the Taiwan Strait. *Acta Ocean. Taiwan.*, **17**, 105-118.
- Liu F.H. and Tung I.H., 1959: The reproduction and the spawning ground of the lizard fish, *Saurida tumbil* (Bloch), of Taiwan Strait. *Report of the Institute of Fishery, Biology of Ministry of Economic Affairs and National Taiwan University*, **1** (3), 1-11.
- Liu H.C. and Yeh S.Y., 1974: Maturity and fecundity of lizardfish, *Saurida tumbil*, in the East and the South China Seas. *Acta Ocean. Taiwan.*, **4**, 225-240.
- Lowerre-Barbieri S. K., Chittenden Jr., M. E., and Jones C. M., 1994: A comparison of a validated otolith method to age weakfish, *Cynoscion regalis*, with the traditional scale method. *Fish. Bull. U.S.*, **92**, 555-568.
- 町田吉彦, 1988: マエソ属. 「日本産魚類大図鑑」(益田 一, 尼岡邦夫, 荒賀忠一, 上野輝彌, 吉野哲夫編), 東海大出版会, 東京, pp. 61-62.
- 前川兼祐, 1961: 瀬戸内海, 特に山口県沿岸における漁業の調整管理と資源培養に関する研究. 山口県

- 内海水産試験場研究業績, 11 (1), 1-483.
- 松原喜代松, 1955: エソ科. 魚類の形態と検索, 石崎書店, 東京, pp. 241-244.
- Matsuyama M., Adachi S., Nagahama Y., and Matsuura S., 1988: Diurnal rhythm of oocyte development and plasma steroid hormone levels in the female red sea bream, *Pagrus major*, during the spawning season. *Aquaculture*, **73**, 357-372.
- 三尾真一, 濱田律子, 篠原富美子, 1975: 東シナ海・黄海における主要底魚類の成長および成熟の経年変化に関する研究. 西水研研報, **47**, 51-95.
- 三尾真一, 田川 勝, 篠原富美子, 山田梅芳, 1984: 東シナ海・黄海における底魚類の食物関係に基づく群集生態学的研究, 西水研研報, **61**, 1-221.
- 宮原 一, 崔 允, 矢部 衛, 中谷一宏, 2002: 沖縄島で採集された日本初記録のエソ科魚類コソデエソ (新称) *Saurida micropectoralis*. 魚類学雑誌, **49**, 127-131.
- Morales-Nin B., 2000: Review of the growth regulation processes of otolith daily increment formation. *Fish. Res.*, **46**, 53-67.
- 森本晴之, 1998: 成熟. 「マイワシの資源変動と生態変化」(渡邊良朗, 和田時夫編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 45-33.
- 麦谷泰雄, 1996: 硬骨魚類の耳石形成と履歴情報解析, 「海洋生物の石灰化と硬組織」(和田浩爾, 小林巖雄編著), 東海大出版会, 東京, pp. 285-298.
- 麦谷泰雄, 1997: 魚類年齢形質の形成と輪紋性状. 「水産動物の成長解析」(赤嶺達郎, 麦谷泰雄編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 9-27.
- Mugiya Y. and Watabe N., 1977: Studies on fish scale formation and resorption - II. Effect of estradiol on calcium homeostasis and skeletal tissue resorption in the goldfish, *Carassius auratus*, and the killifish, *Fundulus heteroclitus*. *Comp. Biochem. Physiol. A*, **57**, 197-202.
- 南西海区水産研究所, 1972: マエソ類について. 本州四国連絡架橋漁業影響調査報告第3号 (昭和46年度), 南西海区水産研究所・日本水産資源保護協会, pp. 220-226.
- 夏莉 豊, 1997: 生化学的分析による近似種の識別. 平成8年度 東海・黄海底魚資源管理調査委託事業報告書, 水産庁, 東京, pp. 5-12.
- 西田 睦, 川口 亮, 森田ひとみ, 1996: ミトコンドリア DNA 分析によるトカゲエソ類における変異の検討. 平成7年度 東海・黄海底魚資源管理調査委託事業報告書, 水産庁, 東京, pp. 12-17.
- 能勢幸雄, 石井丈夫, 清水 誠, 1988: 水産資源学. 東京大学出版会, 東京
- 落合 明, 田中 克, 1986: トカゲエソ. 新版魚類学 (下), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 493-494.
- 岡田立三郎, 久新健一郎, 1955: 東海・黄海産マエソ資源の研究. 西水研研報, **7**, 93-112.
- Olsen E. M., Heino M., Lilly G. R., Morgan M. J., Brattey J., Ernandel B., and Dieckmann U., 2004: Maturation trends indicative of rapid evolution preceded the collapse of northern cod. *Nature*, **428**, 932-935.
- 大滝秀雄, 1980: 以西底魚資源, 「底魚資源」(青山恒雄編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 123-126.
- 大滝秀雄, 庄島悦子, 1978: 資源の減少に伴うキグチ分布域の縮小について. 西水研研報, **51**, 111-122.
- Oki D. and Tabeta O., 1998: Age, growth and reproductive characteristics of the yellow sea bream *Dentex tumifrons* in the East China Sea. *Fish. Sci.*, **64**, 191-197.
- Priede I. G. and Watson J. J., 1993: An evaluation of the daily egg production method for estimating biomass of Atlantic mackerel (*Scomber scombus*). *Bull. Mar. Sci.*, **53**, 891-911.
- Rao K. V. S., 1984: Age and growth of lizardfishes (*Saurida* spp.) from the northwestern Bay of Bengal. *Indian J. Fish.*, **31**, 19-30.
- Reznick D. N., Bryga H., and Endler J. A., 1990: Experimentally induced life-history evolution in a natural population. *Nature*, **346**, 357-359.
- Rijnsdorp A. D., 1993: Fisheries as a large-scale experiment on life-history evolution: disentangling phenotypic and genetic effects in changes in maturation and reproduction of North Sea plaice, *Pleuronectes platessa* L. *Oecologia*, **96**, 391-401.
- 阪本俊雄, 1977: マエソ. 関西国際空港漁業環境影響調査 漁業生物班資料1 (昭和51年度), 社団法人日本水産資源保護協会・関西国際空港建設計画検討のための漁業環境影響調査委員会, pp. 105-115.
- 佐藤哲也, 1974: 東シナ海・黄海産クログチの漁業生物学的研究. 西水研研報, **45**, 23-185.
- 瀬戸内海水産開発協議会, 1989: 瀬戸内水産資源要覧 瀬戸内海およびその外海的主要水産資源動物, 北隆館, 東京, pp. 21.

- 清水昭男, 2006: 生殖生理に関する研究手法と再生産研究への応用. 水研センター研報, 別冊4, 63-70.
- 志水 寛, 1976: ゲル形成能, 「白身の魚と赤身の魚 - 肉の特性」(日本水産学会編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 106-118.
- 志水 寛, 1984: かまぼこ形成能, 「魚肉ねり製品 - 研究と技術」(志水 寛編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 9-24.
- Shimizu Y. and Wendakoon C. N., 1990: Effects of maturation and spawning on the gel-forming ability of lizardfish (*Saurida elongata*) muscle tissues. *J. Sci. Food Agric.*, **52**, 331-338.
- Shindo S. and Yamada U., 1972: Descriptions of three new species of the lizardfish genus *Saurida*, with a key to its Indo-Pacific species. *UO*, **11**, 1-13, **12**, 1-14.
- 菅野康次, 1997: 年齢形質法, 「水産動物の成長解析」(赤嶺達郎, 麦谷泰雄編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 28-38.
- 杉浦 理, 多部田修, 1998: 東シナ海産ウマヅラハギの生物学的特性. 平成9年度シェアドストック管理調査委託事業報告書, 水産庁, 東京, pp. 82-103.
- Summerfelt R. C., 1987: Preface, in "Age and growth of fish" (eds. by Summerfelt R. C. and Hall G. E.), Iowa State University Press, Iowa, pp. xii-xiv.
- Suzuki K. and Kimura S. 1990: A bibliography on methods of aging of fishes (1926-1988). *Annual Report of Toba Aqualium*, **2**, 45-49.
- 鈴木寿之, 瀬能 宏, 花崎勝司, 1995: 日本における分布が確認されたウチウミマダラエソ(新称)について. 伊豆海洋公園通信, **6**, (9), 2-3.
- 高野和則, 1989: 卵巣の構造と配偶子形成, 「水族繁殖学」(隆島史夫, 羽生功編), 緑書房, 東京, pp. 1-34.
- 高尾亀次, 1953: 紀伊水道域のミツエソ *Saurida elongata* について. 内海区水研研報, **4**, 61-74.
- 田中昌一, 1998: 資源の乱獲と回復. 水産資源学総論, 恒星社厚生閣, 東京, pp. 3-5.
- 多々良薫, 1953: 紀伊水道域のマエソ属について(Ⅲ) ホシエソ *Saurida undosquamis* (Richardson) の年令について. 内海区水研研報, **4**, 48-60.
- 多々良薫, 1965: 瀬戸内海におけるマエソの資源生物学的研究. 内海区水研研報, **22**, 1-6.
- Tiewes K., Mines A., and Ronquillo I. A., 1972: On the biology of *Saurida tumbil* (Bloch, 1801) family Synodontidae in Philippine waters. *Philipp. J. Fish.*, **10**, 1-29.
- 時村宗春, 1998: 東シナ海・黄海における底魚資源の管理問題, 「水産資源・漁業の管理技術」(北原武編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 36-44.
- 塚本洋一, 山本圭介, 2007: 平成18年度東シナ海底魚の資源評価. 平成18年度我が国周辺水域の漁業資源評価, 水産庁増殖推進部・独立行政法人水産総合研究センター, 東京, pp. 1457-1466.
- 築山陽介, 多部田修, 1997: 東シナ海産アカアマダイの成熟と産卵. 平成8年度東海・黄海底魚資源管理調査委託事業報告書, 水産庁, 東京, pp. 20-31.
- 鶴田義成, 2006: カタクチイワシの成熟・産卵特性から産卵調査を設計する. 水研センター研報, 別冊4, 41-48.
- 鶴田義成, 高橋章策, 1997: 黒潮続流域および混合水域におけるカタクチイワシ *Engraulis japonicus* の産卵生態. 北水研研報, **61**, 9-15.
- Tung I.H. and Liu F.H., 1965: The age and growth of lizard fish (*Saurida tumbil* Bloch) of Taiwan Straits. *Report of the Institute of Fishery, Biology of Ministry of Economic Affairs and National Taiwan University*, **2** (1), 17-26.
- Tzeng T.D., Lin D.R., and Yeh S. Y., 2002: Comparison on growth characteristics of southern East China Sea's lizard fish (*Saurida tumbil*) between 1970s and 1990s. *Acta Ocean. Taiwan.*, **40**, 93-105.
- 渡邊千夏子, 2006: 資源学的立場からみたマサバ太平洋系群の生殖生態研究の現状と問題点. 水研センター研報, 別冊4, 101-111.
- 渡邊良朗, 1997: 年齢形質の有効性検討, 「水産動物の成長解析」(赤嶺達郎, 麦谷泰雄編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 97-109.
- Wen T.S., Liu H.C., and Yeh S.Y., 1987: Age and growth of lizard fish, *Saurida undosquamis* (Richardson), in the northwest shelf off Australia. *Acta Ocean. Taiwan.*, **18**, 1-15.
- 呉 永平, 多部田修, 1995: 東シナ海産タチウオ *Trichiurus japonicus* の生物学的特性に関する研究. 平成6年度東海・黄海底魚資源管理調査委託事業報告書, 水産庁, 東京, pp. 28-77.
- Wright P. J., 1992: Ovarian development, spawning frequency and batch fecundity in *Encrasicholina heteroloba* (Rupell, 1858). *J. Fish. Biol.*, **40**, 833-844.
- 山田梅芳, 1968: 東シナ海に生息するワニエソの生殖

- 生態について. 西水研研報, **36**, 21-37.
- 山田梅芳, 1971: 東シナ海に生息するタチウオの生殖生態の変化. 西水研研報, **41**, 63-81.
- 山田梅芳, 1986: マエソ, 「東シナ海・黄海のさかな」(山田梅芳, 田川 勝, 岸田周三, 本城康至編), 西海区水産研究所, 長崎, pp. 86-87.
- 山田梅芳, 1993: エソ科, 「日本産魚類検索 全種の同定」(中坊徹次編), 東海大出版会, 東京, pp. 309-313, 1272-1273.
- 山田梅芳, 2000: エソ科, 「日本産魚類検索 全種の同定 第2版」(中坊徹次編), 東海大出版会, 東京, pp. 351-358, 1485-1486.
- 山田梅芳, 田川 勝, 真子 渺, 1965: 東シナ海に生息するワニエソ *Saurida tumbil* (Bloch) の資源量の減少に伴う生殖生態の変化について. 西水研研報, **33**, 1-12.
- 山田梅芳, 池本麗子, 1979: 日本近海産マエソ属3種の識別について. 西水研研報, **52**, 61-69.
- 山田梅芳, 入江隆彦, 中坊徹次, 1992: トカゲエソの2型は別種で, *Saurida elongata* と *S. microrrepis* に相当か. 日本魚類学会1992年年会講演要旨集, p. 3.
- 山田梅芳, 時村宗春, 1998: コウカイトカゲエソ, 「日本の希少な野生水生生物に関するデータブック」(水産庁編), 日本水産資源保護協会, 東京, pp. 82-83.
- 山田梅芳, 時村宗春, 堀川博史, 中坊徹次, 2007: 東シナ海・黄海の魚類誌. 東海大出版会, 東京.
- 山田寿郎, 麦谷泰雄, 1988: 硬骨魚類の耳石および鱗の成長と石灰化. 「海洋生物の石灰化と系統進化」(大森晶衛, 須賀昭一, 後藤仁敏編), 東海大出版会, 東京, pp. 203-217.
- Yamamoto K., 1956: Studies on the formation of fish eggs: I. Annual cycle in the development of ovarian eggs in the flounder, *Liopsetta obscura*. *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser. VI. Zoology*, **12**, 362-373.
- Yamaoka K., Nishiyama M., and Taniguchi N., 1989: Genetic divergence in lizardfish of the Genus *Saurida* from Southern Japan. *Japan. J. Ichthyol.*, **36**, 208-219.
- 八柳健郎, 松清恵一, 宇都宮正, 1953: まえそ属 (*Saurida*) 魚類二種の生態学的研究. 山口県内海水産試験場調査研究業績, **5** (1), 15-20.
- Yeh S.Y., Lai H.L., and Liu H.C., 1977: Age and growth of lizard fish (*Saurida tumbil*) in the East China Sea and the Gulf of Tonkin. *Acta Oceanogr. Taiwan.*, **7**, 134-145.
- 依田真里, 時村宗春, 堀川博史, 山田梅芳, 2002: 東シナ海・黄海産魚類目録およびその地方名. 西海区水産研究所, 長崎.
- 横田龍雄, 1956: 底魚類の生長について. 南海区水研研報, **3**, 58-61.
- 米田道夫, 2006: 大西洋マダラの成長と生殖に及ぼす環境の影響. 水研センター研報, 別冊 **4**, 31-39.
- Yoneda M. and Wright P. J., 2004: Temporal and spatial variation in reproductive investment of Atlantic cod *Gadus morhua* in the northern North Sea and Scottish west coast. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **276**, 237-248.
- 米田道夫, 依田真里, 2006: キダイの生殖生態. 水研センター研報, 別冊 **4**, 125-129.
- 銭谷 弘, 木村 量, 1997: 太平洋岸域のカタクチイワシの資源回復に伴う2~3月産卵量の増加. 日水誌, **63**, 665-761.
- Zhang Q. and Xu X., 1987: Scanning electron microscopic observations on surface structures of *Saurida tumbil* scales. *Acta Zoologica Sinica*, **33**, 162-165 (in Chinese with English abstract).

イルカのソーナー能力の魚群探知機への適用に関する研究^{*1}

今泉 智人^{*2}

Application of dolphin's sonar abilities to echo sounders

Tomohito IMAIZUMI

Abstract : Conservation and management are necessary for sustainable use of fisheries resources. For this purpose, acoustic surveys of fisheries resources using scientific echo sounders are conducted worldwide. Although these surveys are powerful methods of estimating fish stock biomass directly over wide areas, the acoustic survey method has several drawbacks. One is the lack of a definitive method for classifying fish species using echo data and another is that *in situ* target strength (TS) measurement methods can only be applied to resolvable fish at short range or in sparse fish schools. In contrast, dolphins detect, pursue, and prey on fish using their excellent sonar capability known as "echolocation." Dolphins can recognize not only the target size, but also its material and shape. As fish are the main target of dolphins, this sonar capability is applicable to the improvement of artificial sounders used in acoustic surveys and selective fishing.

The present study was performed to investigate the application of a dolphin's sonar abilities to echo sounders. In addition, this study focused on the characteristics of broadband frequency and short duration of dolphin sonar sound and measurement of target strength (TS) spectra of fish using this type of sonar. The broadband frequency characteristics of the TS spectra of fish are believed to be key factors in target discrimination and behavior observation.

First, a system for measuring TS spectra was developed and the accuracy of the TS spectra thus obtained was confirmed using a spectral ratio method based on the ratio of the amplitude spectrum of the reflected and incident waves. The TS spectra of metal spheres could be calculated accurately using a theoretical model, and their backscattering was unidirectional. The frequency characteristics of the scattering of metal spheres agreed closely with the theoretical calculations in a water tank. Therefore, the system and spectrum ratio method are capable of measuring TS spectra accurately.

Second, the TS spectra of anesthetized fish from three species, horse mackerel (*Trachurus japonicus*), sea bream (*Pagrus major*), and chub mackerel (*Scomber japonicus*), were measured in a water tank. The variation in TS spectra with respect to the tilt angle of the fish was also measured for one sea bream. The TS spectra of fish varied considerably among species, individuals, and tilt angles.

Third, the TS spectra of tethered live fish were measured at sea. As we could not confirm the relationship of the position between the transducers and the fish in the sea experiment and because measurements are affected by the directivity functions of transducers, measuring the TS spectra accurately was difficult.

2008年12月22日受理 (Received on December 22, 2008)

^{*1} 東京海洋大学審査学位論文 (掲載に際し投稿規定に沿って一部修正した)

^{*2} 水産工学研究所 〒314-0408 茨城県神栖市波崎7620-7 (National Research Institute of Fisheries Engineering, 7620-7, Hasaki, Kamisu, Ibaraki 314-0408, Japan)

To compensate for the directivity, the fish were suspended with two metal spheres, and directivity was compensated using echoes from the metal spheres. The variations in the TS spectra of the tethered swimming fish (chicken grunt, *Parapristipoma trilineatum*) were observed continuously. The TS spectra of fish with tilt angle changes are considered useful for species discrimination.

Furthermore, because of the very short pulse of the dolphin-like sonar, we could obtain well separated single echoes that would otherwise be multiple echoes for ordinary echo sounders. The sea experiments suffered from directivity problems. We attempted to develop a broadband split-beam (BSB) system to compensate for the directivities of transducers. The split-beam (SB) method can measure the position and direction of the target from the transducer using the time differences calculated from the echoes. These echoes are received by the quadrant arrays of the receiving transducer. The SB method using the broadband signal was first applied. The time difference detection methods were simulated, and we decided to use the cross-correlation method. Second, we confirmed that the measured directivity functions at four sample frequencies agreed with the theoretical directivity function calculated from the positions of the array elements. Third, to confirm the utility of the BSB system, we measured the frequency characteristics of metal spheres at sea. By applying a directivity correction to the measurements, good agreement was obtained between theory and measurement. Finally, we measured consecutive *in situ* TS spectra of fish at sea using the BSB system with high range resolution.

Next, to determine the advantages of the dolphin sonar signals, we examined the sonar signals of dolphins and artificial tone burst waves of the same duration as dolphin-like sonar signals. In the experiment performed at sea, echoes from metal spheres measured using different signals (*i.e.*, the dolphin-like sonar signals and short tone burst waves) were cross-correlated with each incident waveform as a reference or replica.

The signal-to-noise ratios (SNRs) were then compared with those of the original data. The SNRs improved by more than 10 dB for all sonar signals. The SNRs were compared after cross-correlation, and the results indicated that the dolphin-like sonar signals improved the SNR by 9 dB (at maximum) over the tone burst wave. Although broadband signals are susceptible to noise, the dolphin sonar signals have greater potential than the other types.

The findings of the present study will contribute to the development of a system and method of accurately measuring broadband TS spectra of targets with high range resolution. The variations in *in situ* fish TS spectra originating from movement and changes in tilt angle of the target may represent information that will allow species discrimination as well as estimation of size and behavior. We can measure accurate TS spectra of the target using dolphin-like sonar signals with short duration and broadband frequency characteristics. This will help resolve the problems associated with acoustic surveys and contribute to the management of fisheries resources.

Keywords : Sonar of dolphin, broadband sonar signal, target strength of fish, target strength spectrum

第1章 緒 論

1.1 研究の背景

2007年4月に日本国の海洋政策を一元的に進めるための海洋基本法が成立し、同年7月から施行された。本法律は海底資源などの海洋権益をめぐり、日本が周辺諸国との交渉で後手に回っているという現状を踏まえ、内閣総理大臣主導で海洋政策を戦略的に進めるという意図を具現化した。4面を海で囲まれた我が国は、エネルギーの85%を輸入に依存し（経済産業省、2007a）、5,982億ドルの製品を輸出しており（経済産業省、2007b）、世界第2位の経済大国である。また、576万トンの漁獲量を誇る世界第5位の漁業大国（1位中国、2位ペルー、3位インドネシア、4位インド）でもある（農林水産省、2007）。つまり、その生存を海洋に依存した海洋国家であり、他国の領海や経済水域を通過しなければ何も輸出入できない。また、我が国は多数の離島を持つために、比較的広い面積の領海および経済水域を有しており、そこにおける沖合漁業の漁業資源の保護や海底・大陸棚の鉱物資源開発について、国際法上の主権の権利を有している。以上を踏まえると、継続的な食料、資源確保を行うためにも、海洋政策の確立と安定化は、早急に求められる国策であるといえる。

海の憲法と称される国連海洋法によれば、自国周辺200海里内の海洋資源に対して採掘、処理の優先権利が認められる。しかし、一方で自国の経済水域における資源の管理および保全の義務がある。生物資源については、漁獲可能量（Total Allowable Catch）を決定し、適当な保全措置および、管理措置を通じて資源の維持を行い確保する必要性がある。そのために、国は農林水産省を主体として、生物学的漁獲可能量推定のための資源量調査を行っており、得られた複数の独立した情報をあわせて、資源量推定を行ってきた。

水産資源量推定法は大きく分けて、トロール調査や音響調査などの直接法と漁獲量調査などの間接法に分けられる。直接法のメリットは、直接に調査を行うことで、迅速に正確な資源量を推定できる。しかし、調査を行わなければ推定ができない、過去の推定はできないなどのデメリットも存在する。一方で、間接法では、漁労者の漁獲などの情報から推定でき、大掛かりな調査を行わなくても広範囲のデータを得られ、過去の推定もできるメリットがある。しかし、その推定結果には、統計誤差や偏りが入り易いのが事実である。

直接法の1つである音響を用いた水産資源量調査では、

(1) 鉛直方向の分布情報が瞬時に得られる

(2) ネットサンプリングなどのような調査点調査に比べて、連続した調査線調査が行える

(3) 一定期間以上の調査期間があれば、広範囲の海域を迅速に調査でき、限られた調査範囲であれば数時間で繰り返し調査可能

等の、他の調査方法よりも有利な点がある（Simmonds *et al.*, 1992）。音響手法以外で分布や量を推定する直接手法としては、トロールネットなどの使用が考えられる。しかし、音響手法に比べて、

(1) 鉛直方向を瞬時にサンプリングすることは難しく、1回の作業に労力を要し、調査中に実施できる回数が制限される

(2) ネットに対する逃避行動や目合い選択性が生じる

等の原因から、見積もられた値には誤差が生じ、実際の分布や量を正確に推定することがむずかしい。しかし、音響調査手法もすべてを音響だけに頼って調査できるまでには至っておらず、種、体長、成熟段階、年齢などの把握は、トロールなどによる生物サンプリングが基本であり、トロールなどの漁獲調査は音響手法による量推定にも必要不可欠である。

現在 TAC 対象魚種だけでなく、多くの音響資源量調査が行われている（村瀬、木和田、2002; Ohshimo, 2004）。音響を用いた調査においても、

(1) 音響を用いた魚種識別は実用化には至っておらず、音響手法のみを用いて魚種ごとの資源量を得てはいない

(2) 自然状態の魚の反射強度などの基礎情報の計測において、疎な分布や、海底から十分に離れている魚にしか適用できないなど測定条件がかなり制限され、十分実用になっているとはいえない

等の問題点が存在する。これらの音響調査手法の問題を解決し、さらに信頼に足る手法に鍛え上げる必要がある。それにより、水産資源の持続的利用のための資源の管理・確保に資することが、日本の国策の急務の1つである。

一方で、海洋の生態系の最上位と考えられるハクジラの一部のイルカは、エコーロケーション（反響定位）と呼ばれる自身のソーナー能力を用いて、餌を探知、識別し、捕食までを行っている。彼らの聴覚、鳴音については、鳥やコウモリなどの陸上動物ほどではないが、研究が進んでおり、特にその生物ソーナー能力であるエコーロケーションに関しては、比較的精密な実験が行われている。イルカのエコーロケーションに用いられる音波は、数十～数百 μ s の時間的に非常に短い音波であり、その1つ1つは断続的であるため、クリックス（clicks）と呼ばれる。また、そのソーナー

音のスペクトルは、広帯域の周波数特性を有している。

現存するイルカ類は、今から170万年前には、現在のような形態になっていたという。長い年月の間に進化を繰り返し、様々な面で水中生活に適応していった。身体的な変化もさることながら、光の届かない海中で捕食し、障害物を避けるためソーナー能力の技術も獲得していった（大村，1974）。つまり、彼らのエコーロケーション能力は、雑音の多い海中で対象からの反射波（エコー）に含まれる情報を抽出するために、信号の送波方法の制御や、信号処理に重みをおいて進化してきたと考えられる。Au らによればハンドウイルカ（*Tursiops truncatus*）は、物体から反射してきたエコーを聞き分け、物体の大きさ、厚さ、材質、形状などの違いを認識できると報告している（Au, 1993）。対象識別が可能な高いソーナー能力が評価され、現在では訓練されたイルカが、機雷の処理や海軍の水中作業の補助業務などを行っている（Fig. 1-1）（Space and Naval Warfare Systems Center, 1998）。また、大型のハクジラの一種であるマッコウクジラ（*Physeter macrocephalus*）もエコーロケーションを行っており（Móhl *et al.*, 2003）、光の届かない深海で大型の頭足類を探知して捕食している。頭足類は、鰐などの顕著な音響散乱体を持たないため、音波反射の割合が小さい。マッコウクジラは、それらを探知するため、比較的低周波（中心周波数10 kHz）で、非常に大きな音



Fig. 1-1. A bottlenose dolphin leaps out of the water while training. It is wearing an acoustic tracking device (pinger) on its fin.

圧（236 dB re 1 μ Pa (rms)）を放出していることが報告されている。このようなソーナー音を用いて、イルカは対象（魚）からの反射波を脳内で処理して、対象識別などの高度な処理を行い、最終的に捕食を行っていると考えられる。

イルカのソーナーと、魚群探知機などのような人工のソーナー装置を比較すると、多くの共通点が認められる。例えば、イルカのクリックスは、使用周波数が30~200kHzと、魚群探知機と酷似していること、送波音および受信特性に指向性を持たせていること、周波数弁別能力を持ち、受波信号の信号対雑音比を向上させていることなどが挙げられる。一方で、イルカは非常に短いパルス幅で、広帯域の周波数特性を有した信号を用いていること、音源音圧やパルス間隔を状況に応じて調節していることなど（Au and Benoit-Bird, 2003a; Akamatsu *et al.*, 1998）、人工のソーナーと異なることも明らかにされている。

1.2 研究の目的

上述したイルカのソーナー音とその能力の優れた点を、人工のソーナーに適用することが出来れば、上記したような音響水産資源調査の問題点を緩和もしくは解決でき、音響調査技術の大幅なレベルアップに繋がると考えられる。イルカのように使用する音響パルスが時間的に短ければ、高い距離分解能が実現でき、密な群れを単体魚の集まりに分解することができ、自然状態の魚の反射強度などの基礎情報測定における限界の緩和に繋がる。また、広帯域の信号を用いることで、スペクトル情報が得られ、対象識別のための基礎情報の増加に繋がる。さらに、イルカのソーナー音の特徴的な性質は、雑音に対する耐性が大きく、信号対雑音比を上げるのに役立つかもしれない。

そこで、本研究では、短パルス・広帯域のイルカのソーナー音を実際に送受することによって、イルカのソーナー音の優れた点を定性的かつ定量的に明確にすることを目的とする。特に、イルカが対象からのエコーの特性（送受信系+反射体の特性）でなく、対象の散乱特性（反射体のみの特性）を観測していると仮説を立て、対象の音響散乱特性の抽出に主眼を置く。具体的には、イルカのソーナー音の利点の応用の第一ステップとして、広帯域という特徴に注目し、魚1尾の総合的な反射特性、すなわち反射強度の周波数特性（TSスペクトル）を計測する方法を開発する。すなわち、イルカのソーナー音を人工的に送受波し、対象のみに依存する広帯域の反射特性を測定する。

著者らは探傷用の広帯域送受波器を用いる簡易システムによって、イルカ型のソーナー音を人工的に送

受波し、金属球と麻酔をかけたキンギョ（*Carassius auratus*）の散乱振幅の周波数特性を測定することに成功した（今泉ら，2006）。本研究は、この研究の発展として、本格的な広帯域送受波器を用い、より高い信号対雑音比（以下 SN 比）で多くの魚につき TS スペクトルを求め、実海域でも自然状態の魚の TS スペクトルを計測できるようにし、イルカのソーナー音のメリットについて議論する。

- 以下に具体的な目的を示す。
- (1) 広帯域送受信システムを利用し、イルカのような広帯域のソーナー音を送受波し、対象の広帯域での反射特性を精確に測定する
 - (2) 麻酔をかけた魚の広帯域の TS スペクトルを測定し、魚種識別のための情報量増加を試みる
 - (3) 実際の海において、自然状態の魚の群れからのエコーを測定し、高い距離分解能を確認する
 - (4) 懸垂した生きた魚（準自然状態）の TS スペクトルを測定する
 - (5) 自然状態の魚の TS スペクトルを測定できるようにするために、送受波器の指向性補正が可能な広帯域スプリットビーム法を確立する。そのために、広帯域エコーの時間差検出、指向性関数補正のための方法を提案する
 - (6) イルカのソーナー能力の人工ソーナーへの応用方法を考察する

1.3 研究の概要

Fig. 1-2に本論文の構成を示した。

第1章は緒論であり、海洋の国際情勢を踏まえた現状と音響資源調査の技術向上の必要性を述べた。また、人工ソーナーと似て非なるイルカのソーナー音とその能力を紹介し、人工ソーナーの技術向上のための可能性を提案し、本研究を始めた背景と目的について述べた。

第2章では、後章で必要となる水産音響における基礎理論、音響水産資源調査の問題点、イルカのソーナーとその能力について述べる。

第3章では、イルカのような広帯域のソーナー音を用いて、対象の反射特性の精確な測定が可能かどうかを確認するために、散乱特性を理論計算により求めやすい金属球の散乱強度（形状関数）を測定した。そのためには、入射波と反射波の比を用いるスペクトル比法を用いるが、その有用性をまずシミュレーションにより確認した。また、実際に材質の異なる2種類の大きさの金属球の形状関数を、イルカのソーナー音を用いてスペクトル比法で測定し、対象の反射特性を正確に測定可能であることを確認し、後章で使用する方法

を検証した。

第4章では、イルカのソーナー音を用いて、麻酔をかけた魚の TS スペクトルを測定した。魚の TS スペクトルは、魚種、個体差、姿勢により大きく異なるが、既往の結果と比較し、その傾向が同じであることを確認した。また、実際の海で自然状態の魚の TS スペクトルの測定を試みる。生きたまま懸垂した準自然状態魚の TS スペクトルを測定した。魚の姿勢角変動による TS スペクトルの変化を観察でき、対象識別のための基礎情報増加に資する可能性を示した。

第5章では、前章までに確立したイルカのソーナー音を用いた TS スペクトル計測を、より実用に近づけるため、魚が指向性主軸以外のどこにいても測定できる広帯域スプリットビーム法を開発する。まず、広帯域送受波器を中心とする試験システムを構築する。次に、対象の方向を知るための時間差検出法と、指向性

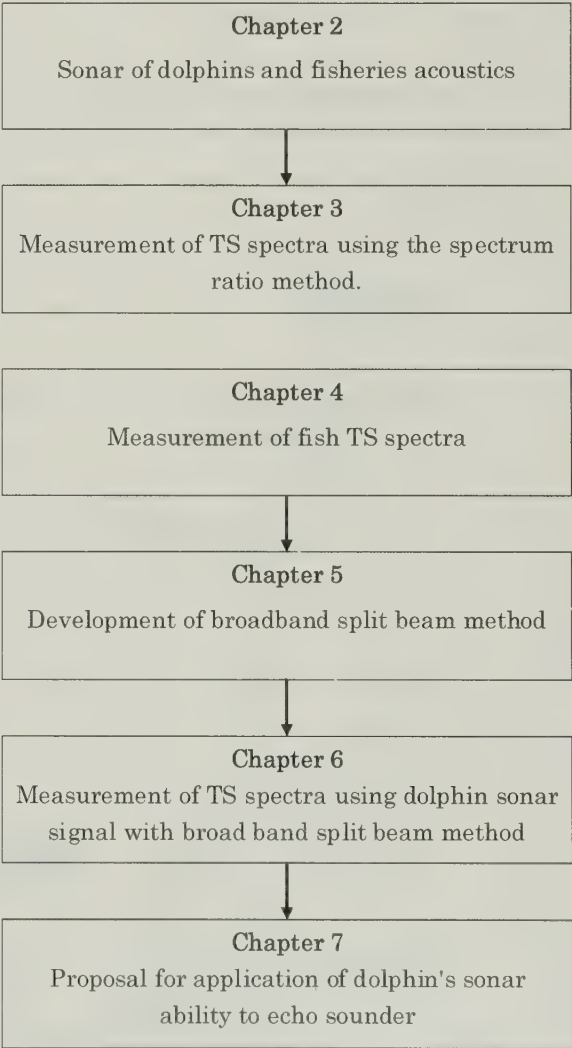


Fig. 1-2. Flow chart of this study.

関数補正のための方法を理論と実験により確立した。

第6章では、前章で提案した広帯域スプリットビーム法を用いて、まず水槽で金属球の位置を測定した。次に対象までの距離を離すことが出来る海上で金属球の形状関数を測定し、広帯域スプリットビーム法としての機能を確認した。さらに、広帯域スプリットビームを用いて自然状態の魚のTSスペクトルを測定した。

第7章では、イルカのソーナー音を人工ソーナーに应用する場合の残る問題点の検討を行った後に、応用方法を提案する。一般に広帯域信号は高いSN比を実現することが難しい。そこで、入射波をレプリカとして相互相関処理を行い、SN比の向上を行なった。また、イルカのソーナー音を用いて測定したエコーに対し、バンドパスフィルタ、整合フィルタフィルタなどのフィルタ処理によるSN比の向上の検討も行なった。最後に、イルカのソーナー音の優劣を総合的に考察し、魚群探知機への適用に関する提案を行った。

第8章では、本研究の総括を行った。

第2章 水産音響とイルカのソーナー

2.1 緒言

本研究の最終目的は、イルカのソーナー能力の水産

音響への応用であり、そのうち特に魚種識別などの高度の情報が必要な音響水産資源調査機器への応用である。また、イルカのソーナーの基本は魚群探知機などの人工ソーナーの基本と同じである。そこで、本章では、後章で必要となる水産音響の基本および概要とイルカのソーナーの概要について記述する。

空中で通信や計測の道具として多く使われている電波は、海水中では減衰が大きく使用できない。一方、空中では近距離における通信手段としてしか使えない音波は、海水中では、減衰が少ないので、最も重要な情報伝達手段である。

魚群探知機やソーナーなどの水中音響機器では、パルスエコー法を用いており、その原理は山彦と同じである。Fig. 2-1にパルスエコー法の基本原理を示す。船底に装備した送受波器から、短時間の波であるパルスを送波すると、これは海中を伝播していく。パルスが、海中の魚などの対象に当たると、その一部は透過するが、ほとんどの音波は反射して反射波（エコー）となり、逆方向に伝搬し、送受波器で受波される。この音波伝播を定式化したのがソーナー方程式である。

ソーナーの基本はソーナー方程式によって記述される。そこで、まずソーナー方程式を見ておく。この方程式の中心的ファクターはターゲットストレングス（TS）であるので、これについてはやや詳しく述べる。

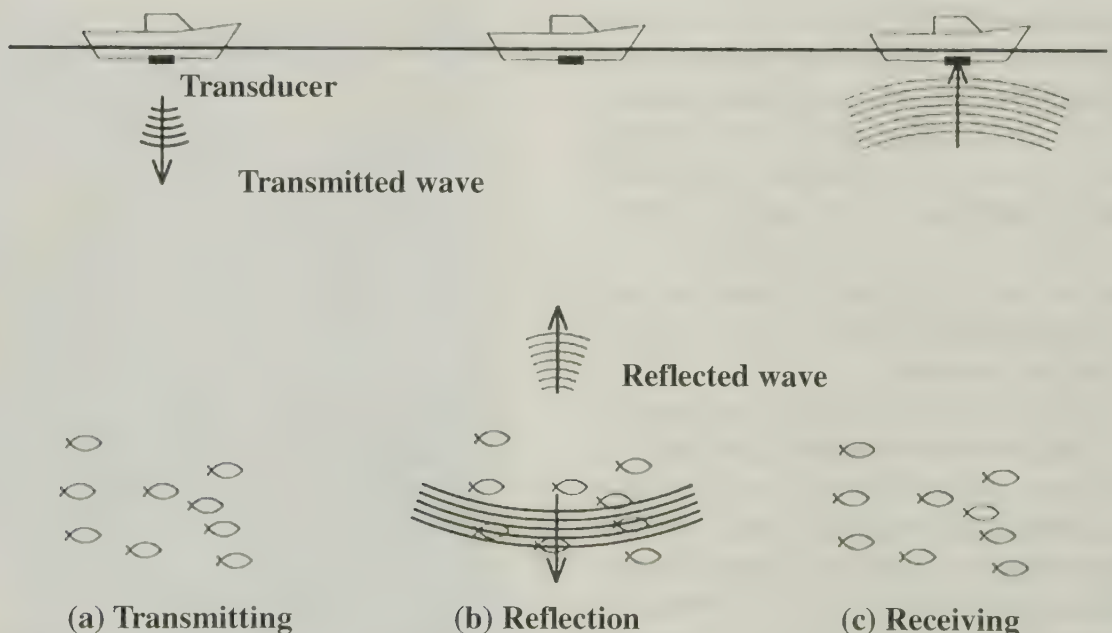


Fig. 2-1. Principle of the pulse echo method. A sound wave is transmitted by a transducer (a), only a small portion of the sound wave is reflected from a fish school (b), the reflected wave is received by the transducer.

魚の TS は水産音響では、中心的な音響パラメータであり、これまでも多くの研究がされている。TS は対象に固有の音響情報であり、TS は、資源量推定のためのスケールファクタであるとともに、TS が魚の体長の 2 乗にほぼ比例することを用いて体長も推定できるので、極めて重要である。

次に、前章で述べた音響水産資源調査の問題点を明確にし、イルカのソーナー能力によるその解決の可能性を探る。そこで、イルカのソーナーについて詳細に述べる。また、イルカのソーナー音を人工的に送受波した先行研究についても紹介し、本研究との違いを述べる。

2.2 ソーナー方程式と水産音響の基本

ターゲットストレングス (TS) は、対象に平面波が入射した時に、入射波の強さ (I_i) に対する対象から 1 m の距離での反射音波の強さ (I_r) の比として、

$$T_s = \frac{I_r}{I_i} \quad (2.1)$$

と定義される (実吉ら, 1968)。一般に魚の TS は大きく変動するため、両辺の常用対数を 10 倍し、

$$TS = 10 \log T_s \quad (2.2)$$

とデシベル値として表す。本論文では、以降、(2.2) 式左辺のように大文字が 2 文字以上の場合にはデシベル量を、右辺のように同じ文字で大文字に添え字付の場合は、線形量を表す。

対象からの散乱波が球面波とみなせる距離では、対象からの散乱波の音圧 P_{scat} は、対象の散乱特性を表す遠距離音場での散乱振幅 Γ と距離に依存する項に分け、

$$P_{scat} = P_{inc} \frac{e^{-jkr}}{r} \Gamma \quad (2.3)$$

と表される (時間依存項は省略)。ここで、 P_{inc} は入射波の音圧、 r は対象から観測点までの距離、 j は虚数単位、 k は波数を表し、 f を周波数とし、 c を音速とすると、 $k = 2\pi f/c$ である。散乱振幅は散乱の大きさの音圧での指標であり、一般に対象の寸法に比べて遠距離では、距離に依存しなくなる。音の強さは、音圧の 2 乗に比例する。

次に、1 尾の魚から帰ってくる反射波の強さを Fig. 2-2 によって説明する。送受波器の真下 (指向性主軸) で 1 m の点での送波音圧を P_0 とすると、魚がいる θ の方向での音圧は、方向による大きさの違いを表す指向性係数 $D(\theta)$ 倍される。送波した音波は距離による減衰と、海水による減衰をうけ、対象 (魚) から反射する。この時、魚への入射波の T_s 倍がエコーとし

て反射する。反射波は拡散と海水による吸収による減衰をうけ、送受波器で受波される。この時受波器で受波される魚からの反射波音圧を P_{fish} とすると、

$$P_{fish}^2 = P_0^2 \frac{e^{-2jkr}}{r^4} \frac{1}{e^{4\alpha r}} D^4(\theta) T_s \quad (2.4)$$

と表される。ここで、 α は海水の吸収係数を表す。このような式は、一連の音波伝播の過程を表しており、ソーナー方程式と呼ばれる。

自然遊泳状態にある魚の TS を測定するためには、魚の送受波器に対する位置または、方向によって、送受波器の指向性を補正する必要がある。指向性関数の補正には、装置の工夫で行う方法と、統計的な処理で行う方法がある。Fig. 2-3 に装置の工夫で行う指向性関数の補正のための 2 つの方法を示す。Fig. 2-3(a) は、デュアルビーム法の原理を示す。デュアルビーム法では、送受波器全体で送波し、受波する狭ビームと、送受波器全体で送波し、その一部で受波する広ビームを使用する。対象が送受波器の中心にあれば、広、狭 2 つの受波ビームに差は生じないが、中心からずれた位置にあれば、レベル差が生じる。あらかじめ、このレベル差と指向性との対応を調べておき、レベル差から指向性を知る。次に、Fig. 2-3(b) にスプリットビーム法 (以下 SB 法) の原理を示す。SB 法の原理は

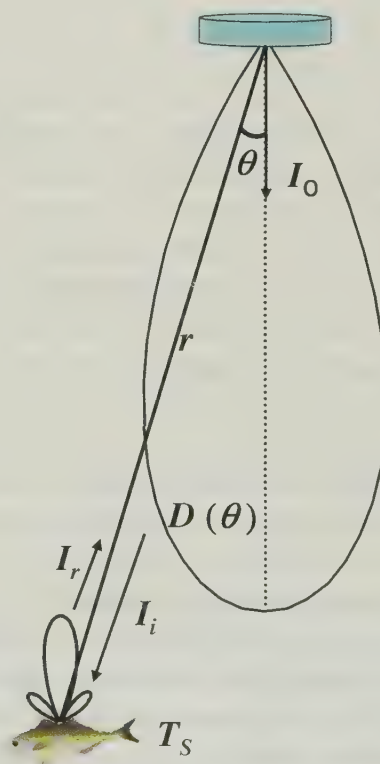


Fig. 2-2. Formation of the single fish echo.

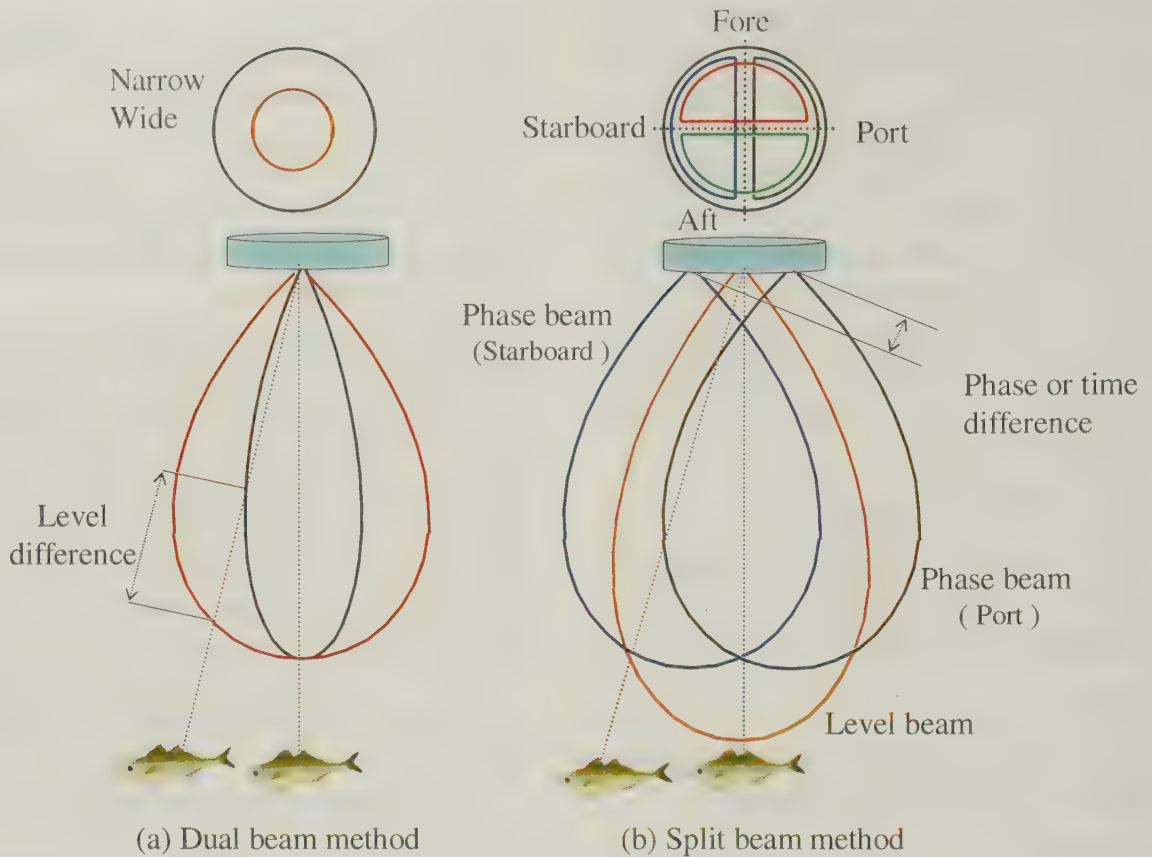


Fig. 2-3. Principles of the dual beam method (a) and the split beam method (b).

音響測位における Super Short Base Line (SSBL) 法とはほぼ同一であり (Ehrenberg, 1979), 受波器を分割し, 位相測定用アレイのペアを2つ作り, それぞれの位相測定用アレイに到達するエコーの時間差により, 前後方向, 左右方向の位相差 (又は時間差) の測定を行う。デュアルビーム法では魚の方向の極角 (球座標 r , θ , ϕ の θ) しかわからないが, SB 法では方位角 ϕ もわかるので, パルスエコー法で得られる距離と組み合わせることで, 送受波器との相対位置を測定出来る。

以上の方法で指向性関数を補正し, ソナー方程式を用いて, 自然状態の魚の TS を測定できる。

2.3 音響水産資源調査とその問題点

音響を用いた水産資源量調査は, 主に計量魚群探知機を用いて行われており, 多くの研究・調査がなされている。計量魚群探知機は, 一種の人工ソナーである魚群探知機を定量化することによって生まれた。調査の例としては, ベーリング海や北海道周辺のスケトウダラ資源量調査 (高尾, 1994; 本多, 2004), 南

極オキアミの資源量調査 (Pauly *et al.*, 2000) などがある。また, ハダカイワシ類の定量的調査 (澤田ら, 2004), など, 直接の漁獲対象ではない生物に対しても, 計量魚群探知機が用いられている。対象の量を定量的に測ることのできる計量魚群探知機による音響調査手法は, 日本では1980年に古澤らによって確立し, わが国でも多くの調査で使用され, 水産資源評価に利用されている (古澤, 1990)。

計量魚群探知機による量推定の基本原理は, 群れからの音波の反射強度は, 群れを構成する生物の量に比例することに基づく (Foote, 1987)。実際の音響資源調査では, 調査海域に配置した複数の調査線上を航走して対象生物からの体積あたりの反射強度 (体積散乱強度, SV) を計測し, これを1個体あたりの反射強度で割って分布密度として量を求める。この1個体あたりの反射強度は, TS であり, 群れからの反射強度を分布密度へ換算するスケールファクタとして重要な音響指標である。つまり, 与える TS の値の誤差もしくは不適が, 分布密度に換算されて誤差をもたらす。確度の高い音響調査を行うためには, 正確な TS を使

用することが必要である (梨本, 飯田, 1994)。

魚の TS に関する研究は多く行われてきた (Nakken and Olsen, 1977; Love, 1971)。宮野 鼻らは、4つの周波数を用いて複数の魚種の TS を測定した (Miyanohana *et al.*, 1990)。魚の TS は、魚種、個体、姿勢により大きく変動することが確認された。その他、多くの研究により、主要魚種の TS については、その値と特性が明らかになり、音響資源調査に使用されている。測定対象が鰐を有した魚 (有鰐魚) の場合、その反射波の 90 % 以上は、鰐によるものである (Foote, 1987)。この魚種や体長などにより異なる鰐の形状をモデル化して、シミュレーションにより姿勢ごとの TS (TS パターン) を計算し、実測ともよく合うことを確認されている (Furusawa, 1988; Sawada *et al.*, 1999)。

一般に TS は、魚の体長、姿勢分布、鰐や脂質などの生理状態、使用する周波数などの複雑な関数である。このため、自然状態の魚群から正確な TS を知ることができれば一番望ましく最良の方法であるといえる。これは、自然状態で得られる TS には、そのときの魚群の体長分布、姿勢分布、生理状態、使用した周波数などが反映されているからである。同じ魚から帰ってくる連続したエコーの連なり (エコートレース) の形状などから、魚の遊泳速度や魚体長を推定し、自然状態の魚の情報量を増やす方法も実用化されつつある (Reid, 2000)。しかし、最も信頼にたつ TS の得られる自然状態 TS 計測 (Ona, 1999) も、疎な分布や、海底から十分に離れている魚にしか適用できないなど測定条件がかなり制限され、十分実用になっているとはいえない。また、直接的に得られる体積散乱強度を、魚種ごとに振り分けるのに必要な魚種識別技術については、多くの研究が続けられているものの (例えば Simmonds *et al.*, 1992)、未だ不十分である。これらの音響水産資源調査方法の問題点の解決が急務である。

2.4 音響による対象識別

音響を用いた魚種識別も、いくつか行われてきた。大きく分けると、計量魚群探知機などのような狭帯域魚群探知機を用いた研究と、広帯域音を利用した広帯域音響機器を用いた研究である。Gyrin らは、周波数 38 kHz の魚群探知機を使用して魚種識別を試みた (Gyrin *et al.*, 1981a, 1981b)。単体魚からの反射波から、TS、反射波の包絡線、反射波のスペクトル、反射波の位相の 4 つの情報を抽出した。さらに魚群からの反射波を扱う場合、魚群密度の分布も使用し、すべての測定値に対して一連の関数として計算しモデ

ルを作成した。3 種類の魚群の形態に適用し、モデルで容易に 3 種に分類できたが、実用的な観点から見れば、この方法はまだ実験段階であると報告されている (Simmonds *et al.*, 1992)。

広帯域音を用いた魚の反射に関する研究もいくつか行われてきた。例えば、Zakharia らは、継続時間が 1 ms または 5 ms で、20 kHz-80 kHz の広帯域チャープ信号を用いて、実海域におけるマサバ、カタクチイワシ、マイワシの 3 種類について、魚種識別を試みた (Zakharia *et al.*, 1996)。彼らは対象の反射波のスペクトル形状と魚群形状とからニューラルネットワークを用いて魚種識別を行っており、70 % 程度の確率で識別に成功している。Simmonds らは、継続時間が 1 ms の 27-54 kHz の広帯域のチャープ信号を、ケージの中に入れた単一魚種の魚に送波し、TS の平均的な周波数特性を求め、標準偏差を利用して、複数の魚種の識別を行った (Simmonds *et al.*, 1996)。また、魚種識別とは異なるが、プランクトンと魚類を分離する方法も行われている。最近の研究では、Mckelvey and Wilson は、38 kHz と 120 kHz の計量魚群探知機を用いて、大西洋タラとプランクトンを 84 % の確度で分離に成功している (Mckelvey and Wilson, 2006)。この研究では、2 つの周波数によるプランクトンと魚の反射強度の違いを利用するだけでなく、モデルも使用している。これらのこれまでに報告されている研究によれば、いずれの方法も条件を限れば識別能力は優れているが、一般の場合に適用可能かどうかは、疑問が残る。

Fig. 2-4 に音響による魚種識別方法のフローチャートを示す。現在音響による魚種識別は、

- (1) 群れの形状などの群特徴
- (2) 反射の周波数特性
- (3) エコー波形の特徴
- (4) TS や遊泳スピードなど音響推定値

と題別できる。しかし、魚種推定のための絶対的な方法はなく、個別の情報抽出の方法を高度化し、情報の種類と量を多くし、それらを複合的に考慮することが、魚種識別の高度化に繋がる。多くの魚種識別のための高精度の情報を集めれば、後は、判別分析やニューラルネットワークなどの汎用の手段に頼って魚種識別の確度が上がる (古澤, 2001)。

2007 年現在、国内でも、魚体長計測機能がついた一般漁労向けの魚群探知機や、複数の音響データを利用した魚種識別計量魚群探知機の開発などが行われ、魚種識別の高度化が進んでいる (社団法人海洋水産システム協会, 2003)。しかし、わが国周辺でも魚の種類は多く、また魚種識別の万能の方法はないので、さら

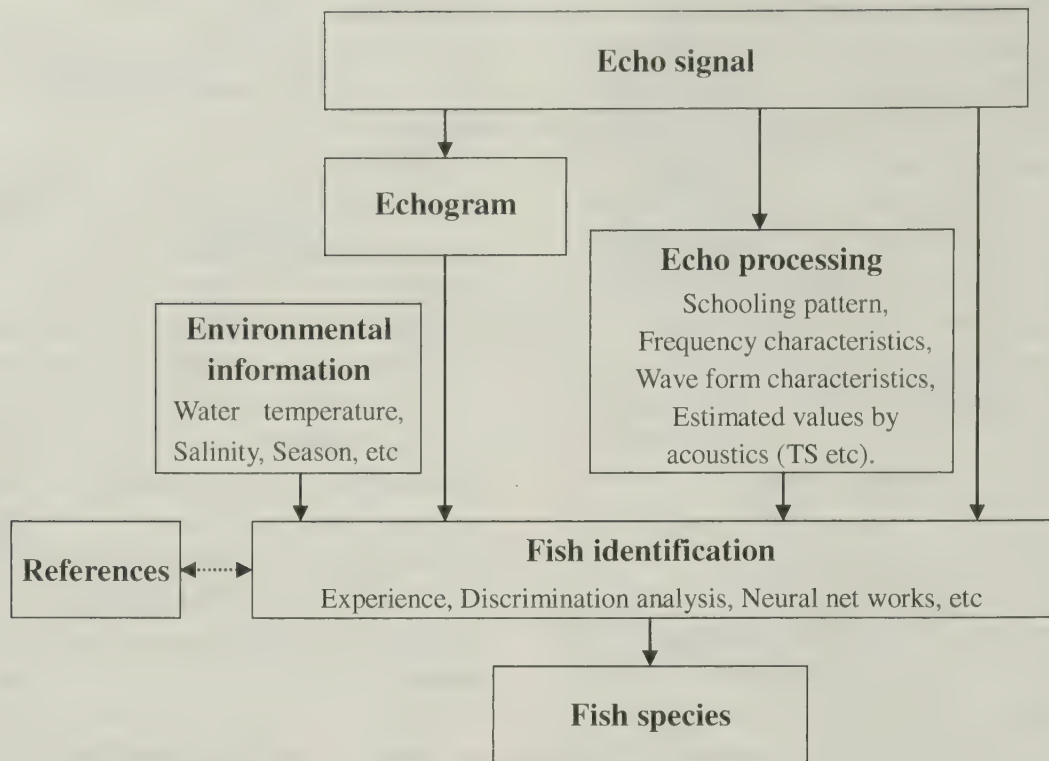


Fig. 2-4. Schematic diagram of fish species identification by using acoustic methods.

なる研究開発が必要である。イルカは、魚を識別した上で捕食の対象としていると考えられるので、特に魚種識別のためにイルカのソーナー能力の研究が重要である。

2.5 イルカのソーナー

多くのハクジラ類は、超音波を発し、その反射から己の位置や餌の方向を知るエコーロケーションと呼ばれるソーナー能力を有している。エコーロケーションという言葉を使用したのは、生物ソーナー研究の始祖ともいえる D. R. Griffin である。エコーロケーションは、反響定位とも呼ばれており、「生物が音を発しエコーを聞くことによって、物体の定位、判別、認知やナビゲーションを行うこと」と定義される。ハクジラ類のエコーロケーション能力は、雑音の多い海中でエコーに含まれる情報をうまく抽出するために信号の送波方法の制御や、信号処理に重みを置いて進化してきたと考えられる。ハクジラ類の歴史は長くその起源は、今から約6500年前、白亜紀の終わりまでさかのぼると言われる。ハクジラ類の祖先は、白亜紀の終わりに現在の地中海の東部からペルシア湾辺りにかけて生息していた原始的な肉食性哺乳類であるメソニック

ス類であると考えられている。この長い期間の間にエコーロケーション能力を獲得し、進化させた（大村, 1974）。

Au によりイルカのエコーロケーション能力についての多くの報告がまとめられている（Au, 1993）。ハンドウイルカ（*Tursiops truncatus*）は、直径2.5 cm のスチール球を70m はなれた地点で検知することができ、直径を3倍に変えた場合は100 m 以上離れてもスチール球の有無を検知できるとされている。また、中空になっている円筒の厚みの差を0.2 mm 程度まで検出でき、同じ大きさで異なる材質の物体を区別できることが報告されている。また、Nakahara *et al.* が、小型のイルカであるスナメリも、ハンドウイルカと同じように対象の大きさや材質の違いを、かなりの精度で識別できることを報告している（Nakahara *et al.*, 1997）。これらの研究において、イルカが材質や形そのものをエコーロケーションでわかるわけではない。対照となる物体があって、それとの区別を行わせて得られた結果である。

近年、イルカが、対象のエコーから直接物体特性を抽出していることが報告された（Harley *et al.*, 2003）。つまり、イルカはエコーロケーションに用い

るソーナー音を利用して物体の特徴を抽出していることが確実に示された。Au の実験結果にあるような高い弁別能力を人工のソーナーに利用できるようになれば、対象である魚の質、形状の違い等の情報量を増やすことが出来ると考えられる。

多くの研究により、ほとんどのイルカ類のエコーロケーションに用いられる音波（クリックス）が計測され、分類された。中村らによれば、イルカ類のクリックスは、大きく分けると2種類に分けられる（Nakamura and Akamatsu, 1998）。Fig. 2-5に代表的なイルカ類のクリックスの波形と、その振幅スペクトルを示す。イルカ類のクリックスは、大きく分けると、ハンドウイルカ型（bottlenose dolphin type）とスナメリ型（finless porpoise type）に分けられる。ハンドウ型の特徴は、数十 μ sの間に鋭く立ち上がり、振幅スペクトルは、広帯域の周波数特性を有している。一方で、スナメリ型は、ハンドウ型よりも多くのサイクルからなる波形で、振幅スペクトルはハンドウ型よりも帯域が狭い。なぜこのような2種類に大分できるかは、様々な説があるが（Amundin, 1991; Goodson, 1997）、解剖学的検知から考察した中村らによれば、内部構造器官によるものであり、餌、生活環境などに

より異なる進化を遂げてきたからと考察している。これらのイルカのような時間的に短い音波を用いて、広範囲を探知することが出来れば、高い距離分解能が実現でき、密な群れのエコーを単体魚のエコーの集まりに分解することができ、自然状態の魚の反射強度などの基礎情報測定における限界点の緩和に繋がる。

イルカのソーナー音を人工的に利用した研究もいくつか行われている。Benoit-Bird らは、3種類のイルカ型のソーナー音を人工的に送受波し、210 dB 程度の音圧で複数の魚種にあて、痺れるか、または、死に至るかを調べ、そのような事実はないことを報告した（Benoit-Bird *et al.*, 2006）。また、Benoit-Bird らは他の研究で、無人水中探査機（Remotely Operated Vehicle; ROV）に広帯域送受波器を設置し、イルカ型のソーナー音を用いてフエダイの TS の深度依存性がないことを報告した（Benoit-Bird *et al.*, 2003）。Capus らは、ハンドウイルカのソーナー音を解析し、ダブルチャープという特徴を見つけ、それを真似た人工音により、銅の較正球のエコーを識別した（Capus *et al.*, 2007）。Au らは、ハンドウイルカ型とスナメリ型のソーナー音を送受波して、4種類の魚の姿勢角の関数として TS を測定し、ハンドウイルカとスナメリ

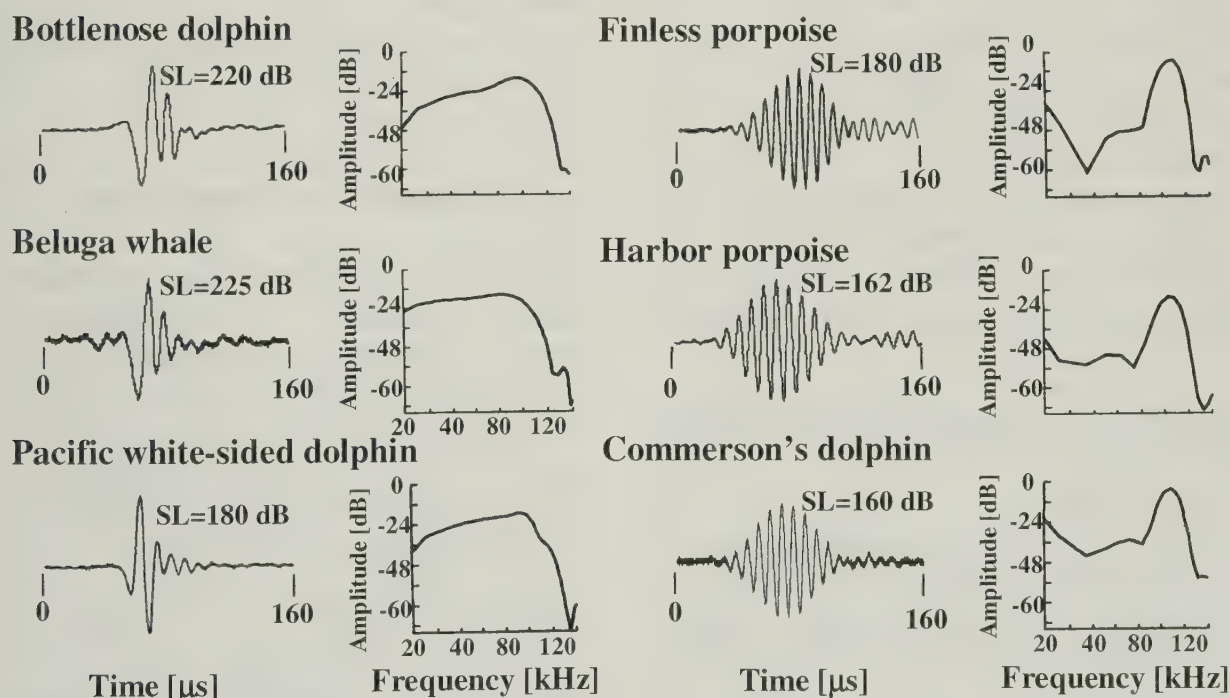


Fig. 2-5. Wave forms and amplitude spectra of dolphin's click. The left side figures are classified as the bottlenose dolphin type and the right side the porpoise type. "SL" shows click source level at 1 m.

の探知範囲を推定した (Au *et al.*, 2007)。これらの研究は、多くの部分で、イルカのソーナー音のメリットを議論している

本研究は、イルカのソーナー音の利用という点では、上記の研究と共通点を持つが、主に TS スペクトルに着目し、魚種識別のための情報量増加と、自然状態の魚の TS 測定条件の緩和を目的としており、上記の研究とは目的が異なる。

2.6 結 言

本章では、本研究を進めるにあたって必要な音響による海洋生物の計量方法の理論や、問題点の確認、イルカのソーナー能力などの知見を述べ、次章以降の準備とした。

まず 2.2 節で、最も重要な音響指標である TS の定義と、その既往の研究について述べた。また、音波伝播の過程を表すソーナー方程式について述べ、自然状態の魚の TS の求め方を述べた。次に 2.3 節で現状の音響水産資源調査とその問題点について述べた。自然状態の魚の TS 測定条件が厳しいこと、体積散乱強度を魚種ごとに分けることがむずかしいという 2 点が、大きな問題点であることを確認し、その解決のためにイルカのソーナー能力に学ぶべきことを述べた。

2.4 節で、体積散乱強度を魚種ごとの資源量に分けるために、音響を用いた対象識別について既往の研究を述べた、これらは十分には実用化には至っておらず、魚種推定のための絶対的な方法はなく、個別の情報抽出の方法を高度化し、情報の種類を多くし、情報の質を上げることが必要である。

最後に 2.5 節でイルカのソーナーについて述べ、その優れた点を人工のソーナーに応用できれば、上述した音響水産資源調査の問題点の解決の可能性があることを示した。また、先行研究として行われているイルカのソーナーの人工利用についてふれ、本研究との違いを述べた。

第 3 章 スペクトル比法を用いた TS スペクトルの測定

3.1 緒 言

イルカのソーナー音の特長は、第 2 章で述べたように、継続時間が短く広帯域であることである。もしそのような音波で、魚などの対象を観察すると、距離分解能が高いので、個々の魚のエコーを分離しやすく、また反射の周波数特性 (スペクトル) を観測しやすい。つまり、個々の魚のターゲットストレングス (TS) のスペクトルを求めるのにイルカのソーナー音は都合が良い。本研究では、イルカのソーナー音により魚の

TS スペクトルを計測できるようにすることを主な柱としている。本章ではそのための方法を確立する。すなわちスペクトル比法という広帯域の定量的観測に便利な方法を導入し、散乱特性が理論的に明確な金属球によって、方法と測定システムを検証し、次章以降の魚の TS スペクトルの計測に備える。

本研究では、イルカが送受信系 + 反射体でなく、対象の散乱特性 (反射体のみ) を観測していると仮説を立て、その考え方を人工のソーナーに応用する。エコーには、反射対象の特性のみでなく、送受信系および音波伝搬上の特性が複合しており、エコーの特性のみからでは、対象の識別などをすることがむずかしい。そこで本章では、対象の散乱特性のみをエコーから抽出する方法を開発し、実際に金属球の散乱特性を計測する。

3.2 節では、スペクトル比法を用いた、対象の TS スペクトルの測定方法を述べる。3.3 節では、方法の検証のために用いる金属球の散乱の周波数特性 (形状関数) を理論計算で求める。3.4 節で、シミュレーションを用いてスペクトル比法により求めた形状関数と、理論計算で求めた形状関数を比較し、スペクトル比法の有効性を確認する。

3.5 節で、実験に用いる広帯域送受信システムを構築し、その各特性を調べる。また 3.5 節で、用いるイルカのソーナー音の特徴を述べる。3.6 節では、構築した実験システムとイルカのソーナー音を使って実際に金属球の形状関数を測定する。本章では最終的に、散乱振幅のスペクトルを精確に測定する方法を確立する。

3.2 散乱振幅のスペクトル測定のためのスペクトル比法

送波器からの送波パルスが、距離 r にある対象に入射波 $p_i(t)$ (t は時間) として到達し、受波器に反射波 $p_r(t)$ が戻るとする。エコー波形が定常となる長バースト波を使用する場合は、前章で述べたとおり、入射波振幅にキャリア周波数での散乱振幅を掛けたものがエコーの振幅となる。しかし、本研究では対象の散乱振幅の周波数特性を扱うので、入射波と反射波のフーリエ変換の関係

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_r(t) e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} p_i(t) e^{-j\omega t} dt \frac{e^{-j\omega r/c}}{r} e^{2j\alpha(\omega)} \Gamma(\omega) \quad (3.1)$$

を用いる。ここで ω は角周波数 ($\omega = 2\pi f$)、 $\Gamma(\omega)$ は対象の散乱振幅の周波数特性、 $\alpha(\omega)$ は海水の吸収係数の周波数特性である。入射波 p_i と反射波 p_r のフーリエ変換をそれぞれ P_i 、 P_r とし、(3.1) 式を散乱振幅 $\Gamma(\omega)$ について整理すると

$$\Gamma(\omega) = re^{j\omega r/c} e^{2r\alpha(\omega)} \frac{P_r(\omega)}{P_i(\omega)} \quad (3.2)$$

となり、入射波と反射波のスペクトルの比を取ることで、対象の散乱振幅の周波数特性もしくはTSスペクトルを得ることができる (Neubauer *et al.*, 1974; Dragonette *et al.*, 1974)。本研究ではこの原理を用い、これをスペクトル比法と呼ぶ。なお、TSの線形量 T_S および、デシベル量 TS と散乱振幅 Γ との関係は、

$$TS(\omega) = 10 \log T_S(\omega) = 20 \log |\Gamma(\omega)| \quad (3.3)$$

で表される。

また、対象が球の場合は、球の半径 a で規準化し、 ω の代わりに無次元周波数 ka を用いることで、

$$|f_\infty(ka)| = \frac{a}{2} \Gamma(ka) = \frac{a}{2} \Gamma(\omega a/c) \quad (3.4)$$

として表せる。ここに、 k を波数、 f_∞ は形状関数である。形状関数は、対象の材質、寸法と波長の比、形で変化する関数であり、球の場合は、戻り散乱に指向性がないため、均一の材質で作成された球は、その散乱特性を理論的、実験的に求めやすい。また、海水温度などの環境要因による特性変化が少ないため、タンゲステンカーバイドや銅などの金属球は、計量魚群探知機の較正に使用されている (宮野鼻, 1994; Foote *et al.*, 1987)。

以上、スペクトル比法による散乱振幅の周波数特性の測定の原理を述べた。実際には、(3.1) 式の入射波と反射波とも、送信系により放射されたパルスを受信系で観察するので、それらの特性を考慮に入れなければならない。もし、送受信系に共通のシステムを用いると、(3.2) 式の比をとる過程でそれらが消える。広帯域の送受信系の特性を測定するのは容易でなく、誤差が入る可能性も増す。したがって、スペクトル比法の最大の長所は、これらの特性測定もしくは較正を必要とせず、精確なTSスペクトルが得られる点である。しかし、この方法では、反射波とは別に入射波を測定する必要がある。

3.3 金属球の形状関数

本節では形状関数が比較的容易に理論計算で求められる金属球の形状関数の周波数特性の理論値と実測値を比較し、広帯域のTSスペクトル測定が可能であることを確認する。そのために本節では、金属球の散乱特性である形状関数を理論的に計算により求める。

金属球の反射特性はFaranにより導かれ (Faran, 1951), Hickling らが実験的に検討している (Hickling, 1962)。金属球の形状関数は、媒質中の音速を c 、散乱体の縦波の音速を c_1 、横波の音速を c_2 とした場合、

それぞれの音速に対する波数 k と半径 a の積 ka 、 k_1a 、 k_2a と、媒質の密度 ρ 、散乱体の密度 ρ_1 の5つのパラメータにより決まる関数である。

Foote によれば、 c_1 、 c_2 、 ρ 、 ρ_1 は一定材質と常温下において大きく変わることはない (Foote, 1983)。ゆえに5つのパラメータのうち c_1 、 c_2 、 ρ 、 ρ_1 の4つを定数とすれば、 k_1a 、 k_2a は周波数 f と球の半径 a の積 fa によって決定されるので、 $|f_\infty|$ は ka または fa の関数となる。さらに fa は、 ka と c によって決定されるので、最終的には $|f_\infty|$ は c と ka の関数 $|f_\infty(ka)|$ として表すことができる。形状関数 $|f_\infty(ka)|$ の実際の計算式を以下に示す。

$$|f_\infty(ka)| = \frac{2}{ka} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (2n+1) \sin \eta_n e^{-j\eta_n} \quad (3.5)$$

(3.5) 式中の η_n は球ベッセル関数を用いることにより、次式のように表せる。

$$\tan \eta_n = - \left[\frac{J_n(ka)F_n - kaJ'_n(ka)}{n_n F_n - kan'_n(ka)} \right] \quad (3.6)$$

ここで、 J_n は、第一種 n 次の球ベッセル関数、 n_n は第二種球ベッセル関数であり、(3.6) 式中の F_n もベッセル球関数を含み、次式のように表せる。

$$F_n = \frac{\rho}{\rho_1} \frac{(k_2 a)^2}{2} \frac{(A-B)}{(C-D)} \quad (3.7)$$

(3.7) 式において

$$\begin{aligned} A &= \frac{k_1 a J'_n(k_1 a)}{k_1 a J'_n(k_1 a) - J_n(k_1 a)} \\ B &= \frac{2(n^2 + n) J_n(k_2 a)}{(n^2 + n - 2) J_n(k_2 a) + (k_2 a)^2 J'_n(k_2 a)} \\ C &= \frac{(k_1 a)^2 [\sigma / (1 - 2\sigma)] J_n(k_1 a) - J'_n(k_1 a)}{ka J_n(ka) - J_n(ka)} \\ D &= \frac{2(n_2 + n) [J_n(k_2 a) - k_2 a J'_n(k_2 a)]}{(n^2 + n - 2) J_n(k_2 a) + (k_2 a)^2 J'_n(k_2 a)} \end{aligned}$$

である。ここで σ は、散乱体のポワソン比を表し、

$$k_1 = \frac{2\pi f}{c_1}, \quad k_2 = \frac{2\pi f}{c_2} \quad \text{である。以上が、形状関数を理論的に求める計算式である。}$$

Table 3.1に示すパラメータで理論的に求めたタンゲステンカーバイド (以下 TC)、銅、外部 (内部) からの力に対して変形しない理想的な物体である剛体の3種類の形状関数を、Fig. 3-1に示す (宮野鼻, 1994)。剛体のパラメータは、便宜的にTCの音速に10,000m/sを加え、密度を100倍とした。Fig. 3-1において、材質、使用する周波数、大きさ (球の半径) が異なれば、その反射特性が大きく異なることがわかる。例えば、TCの形状関数は、 ka が7.3、10.8のとき著しく値が変化している。これは、金属球の共振によるものである。銅球は形状関数の値の変動が、他の2種

Table 3-1. Physical parameters used to calculate the form function of metal spheres.

	Copper	Tungsten carbide	Rigid
Longitudinal wave speed c_1 [m/s]	4785	6867	16867
Shear wave speed c_2 [m/s]	2288.5	4161.2	14161.2
Density of metal ρ_1 [kg/m ³]	8947	14900	1100000
Poisson ratio σ	0.3497	0.2095	0.2095

Density of seawater $\rho=1000$ kg/m³, sound speed in seawater $c = 1500$ m/s

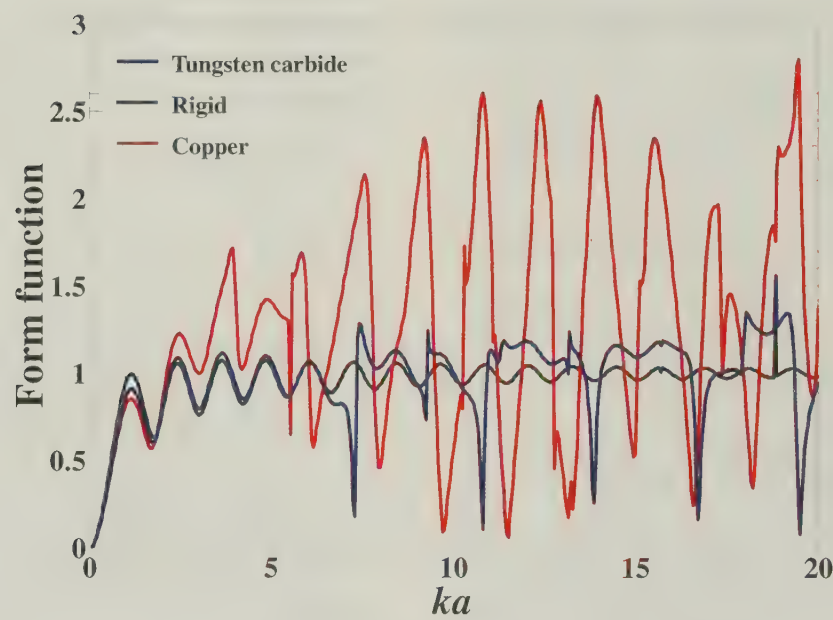


Fig. 3-1. The form functions of metal spheres. The x axis shows the product of wavelength and sphere radius, the y axis shows value of the form function.

類の球よりも大きい。また、剛体の形状関数は共振点がなく、 ka の小さいレイリー領域を除けばほぼ1を上下している。TC球の形状関数は、 ka が5以下であれば、ほぼ剛体のそれと等しい。

3.4 シミュレーションによるスペクトル比法の説明

本節では、3.3節で述べた方法で、対象の散乱振幅のスペクトルを求められるかをコンピュータ・シミュレーションによって確認する。Rudgersは、シミュレーションと実測により数種類の金属球の形状関数の比較を行っている (Rudgers, 1969)。本節では、同様の方法を用いて剛体の球に対するシミュレーションを行った。すなわち、シミュレーションにより作成された入射波と金属球からの反射波とを用いてスペクトル比法により形状関数を求め、金属球の形状関数の理論値と比較する。

Fig. 3-2にシミュレーションのフローチャートを示す。今、対象への入射波を $p_i(t)$ とし、そのフーリエ変換を $P_i(\omega)$ とする。散乱現象は (大きさ)/(波長) を変数として表すと、変数が1つ減り都合がよい。そこで、時間 t と角周波数 ω の関係を保ちながら、 ω を ka に変換する。波数 k と球の半径 a の積は、と表すことができるので、と表し、とおけば、 ω と t の倍率が変わるだけで、フーリエ変換できる。矩形短バース

ト波を $p_i(\tau)$ とすると、

$$ka = \frac{2\pi}{\lambda} a = \frac{a}{c} \omega \quad (3.8)$$

と表すことができる。ここで、 $\Pi(x)$ は、 $|x| \leq \frac{1}{2}$ のとき $\Pi(x)=1$ となり $|x| > \frac{1}{2}$ のとき $\Pi(x)=0$ となる矩形波であり、 m は無次元のパルス長、 p_0 は短バースト波の音圧振幅、 k_0 は短バースト波の波数である。正弦波のサイクル数を b とすると、 $m = 2b\pi(k_0 a)^{-1}$ である。このフーリエ変換は、

$$P_i(ka) = \int p_i(\tau) e^{-ka\tau} d\tau \\ = \frac{p_0}{2j} \left[\frac{1 - e^{j(k_0 - k)am}}{(k_0 - k)a} + \frac{1 - e^{-j(k_0 + k)am}}{(k_0 + k)a} \right] \quad (3.9)$$

と表せ、 $(k_0 - k)a$ を X 、 $(k_0 + k)a$ を Y とおくと、(3.9) 式は次式のように表せる。

$$P_i(ka) = \frac{(1 - e^{jmX})}{X} - \frac{(1 - e^{jmY})}{Y} \quad (3.10)$$

以上により、入射矩形短バースト波の振幅スペクトルを理論的に求められる。

次に、入射波のスペクトルに形状関数の理論値をかけ、反射波のスペクトルを作成した。反射波のスペクトルを逆フーリエ変換して、反射波の波形を作成した。得られた反射波の波形をもう一度フーリエ変換し、反射波の振幅スペクトルを作成し、比をとりシミュレー

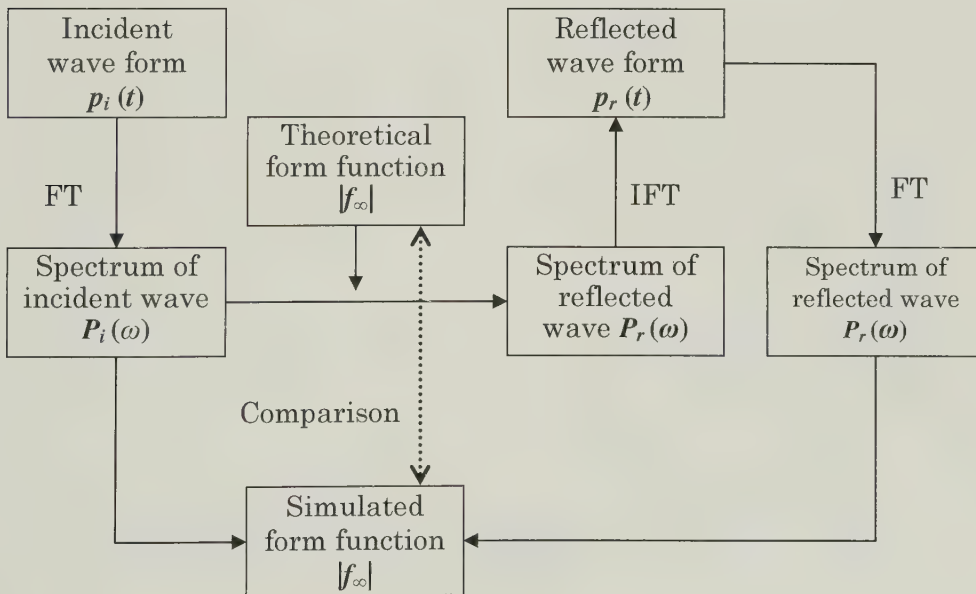


Fig. 3-2. The schematic diagram of simulation of the form function. "FT" stands for Fourier transform and "IFT" stands for inverse Fourier transform.

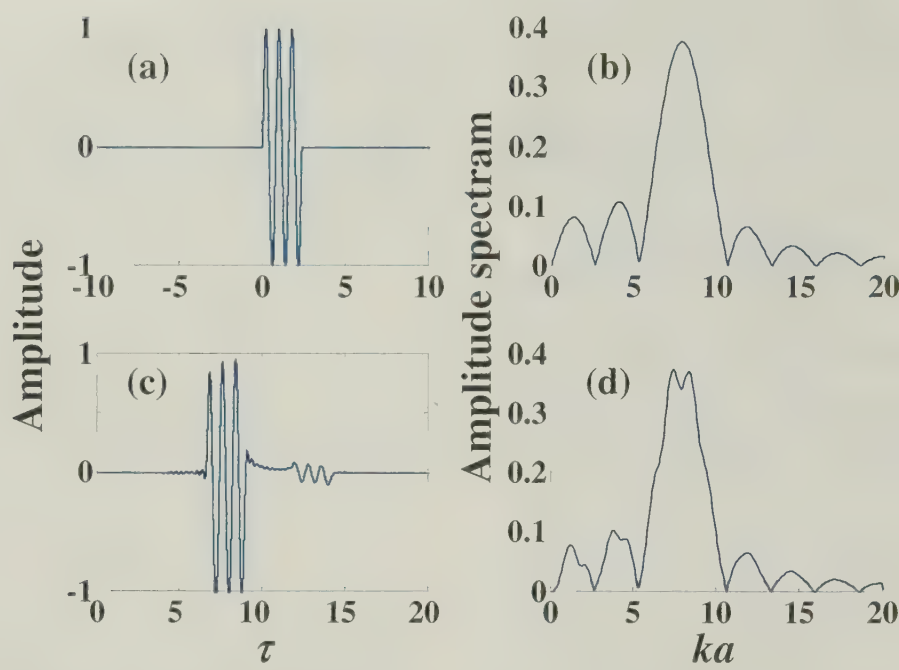


Fig. 3-3. The wave forms and amplitude spectra by simulation. The incident wave form (3 cycle tone burst wave) (a), amplitude spectrum of the incident wave (b), the reflected wave from of a rigid sphere (c), and the amplitude spectrum of the reflected wave (d).

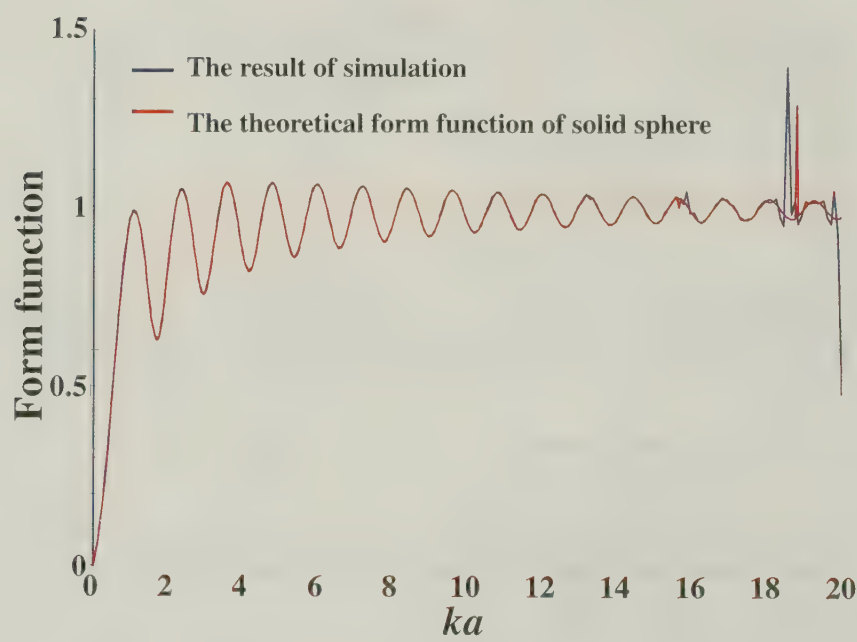


Fig. 3-4. Comparison of the theoretical form function of the rigid sphere with the simulation result of the spectrum ratio method.

ションによる形状関数を作成する。

中心周波数が100 kHz で、 3 サイクルの短バースト波を用いて、 剛球からの反射波をシミュレーションにより作成した。このとき、 音源と剛球の距離は1 m とした。Fig. 3-3に作成した各波形と、 振幅スペクトルを示す。シミュレーションした反射波における副次的な波は、 クリーピング波によるものであり、 球の周囲を回ってくるので遅れが生じて (Rudgers, 1969), これらが形状関数に緩やかな凹凸の特性を与えている。次に、 得られた入射波と反射波の振幅スペクトルの比を取った結果を Fig. 3-4に示す。シミュレーションにより再現した形状関数と、 計算で求めた理論形状関数がよく一致している。

以上シミュレーションにより、 スペクトル比法を説明した。反射波の波形はシミュレーションにより得られたものであるが、 逆変換により元に戻した形状関数はシミュレーションによる結果とは言えないので、 スペクトル比法そのものを検証したことにはならない。しかし、 スペクトル比法で用いる計算過程の検証にはなった。

3.5 広帯域送受信システム

TS スペクトルを計測するために、 広帯域送・受波器を中心とする広帯域送受信システムを構築した。こ

の節では、 このシステムの構成および特性と、 使用したイルカのソーナー音の特徴を述べる。

Fig. 3-5に本研究のために構築した送受信システムを示す。スペクトル比法を実現するために、 送波器と受波器は特性の揃ったものを別途製作した。広帯域の送波器、 受波器、 プリアンプ(すべて古野電気㈱に特注) 以外は、 市販の装置を用いた。送波部では、 任意波形発生装置 (NF 回路ブロック, WF1946a) により発生した信号を、 パワアンプ (Accuphase, PRO-10, 最大増幅率 40 dB) で増幅し、 送波器へと出力する。受波部では、 音波を受波器で受け、 プリアンプで増幅し、 オシロスコープ (Tektronix, TDS3000) で直接観察および測定を行い、 受信信号を GPIB を介して、 PC に収録した。

用いたソーナー音は、 ハンドウイルカ、 スナメリ、 および比較の為に中心周波数が100kHz で 3 サイクルの短バースト波の 3 種類である。ハンドウイルカ、 スナメリのソーナー音、 3 サイクルの短バースト波それぞれの振幅スペクトル、 送波器の送波感度、 受波器の受波感度、 感度積を Fig. 3-6に示す。イルカのソーナー音は個体や条件により多少異なる特性を持っていることが知られている。また、 ビーム幅10°程度の強い指向性を有しており、 送波ビームの指向性主軸上でない部分では、 特性が大きく異なることも報告

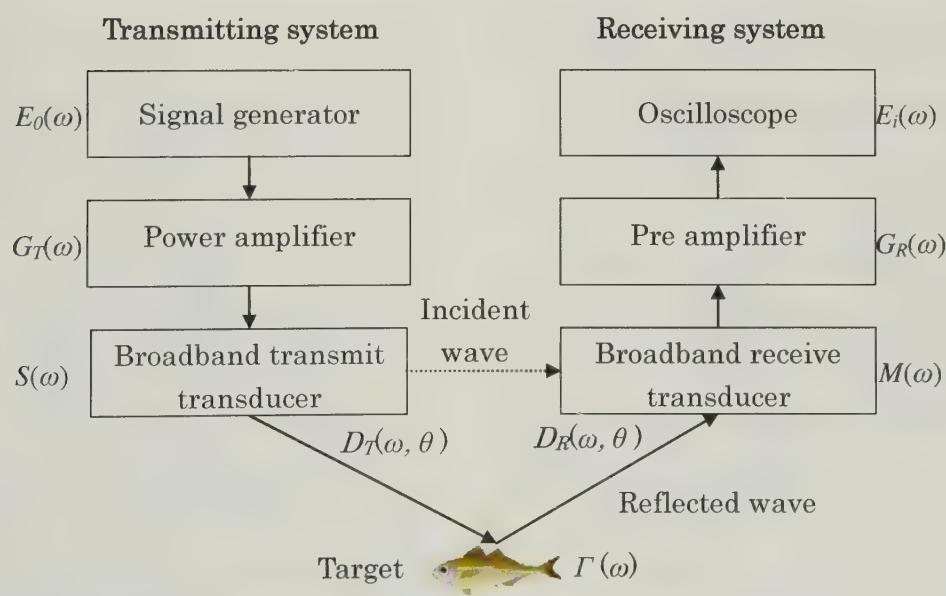


Fig. 3-5. The schematic diagram of the broadband transmitting and receiving system used in the experimental setup.

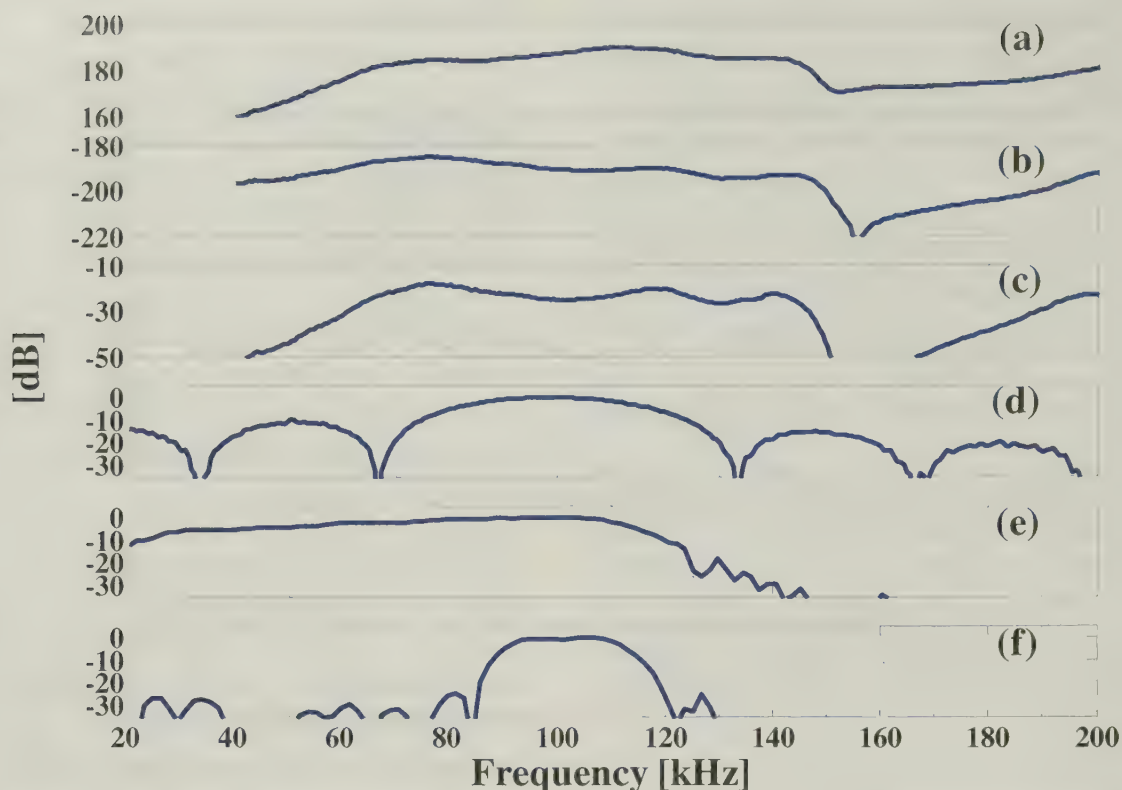


Fig. 3-6. Frequency characteristics of transmitting sensitivity (a), receiving sensitivity (b), and sensitivity product (c). Amplitude spectra of 3-cycle tone burst (d), bottlenose dolphin sound (e), and finless porpoise sound (f).

されている (Au, 1993)。本研究では、国内の水族館で注意深く測定された中村らのものを代表例として使用した (Nakamura and Akamatsu, 1998)。中村らは、9種類のイルカのソーナー音を、陸上からビデオカメラで行動観察しながら、広帯域ハイドロフォンで収録し、イルカの頭部がハイドロフォンの方向を向いている時のみの音波を解析している (Nakamura and Akamatsu, 1998)。

Fig. 3-6 (e) に示すようにハンドウイルカのソーナー音は100 kHz 付近にピークを持ち、バンド幅 (スペクトルが3 dB 落ちる - 3 dB 帯域) は55 kHz から115 kHz と広い。スナメリ (Fig. 3-6 (f)) は、110 Hz 付近にピークをもち、バンド幅は92-112 kHz とハンドウイルカに比べると狭い。一方、使用するシステムの送波感度 (Fig. 3.6 (a)) は、110 kHz にピークを持ち、60 kHz 以下で大きく下がっており、65 kHz から140 kHz の平坦な部分では、5dB 程度変動がある。送波感度と受波感度を掛け合わせた感度積 (Fig. 3.6 (c)) では、65 kHz から125 kHz まで、ほぼ平坦な特

性を持っており、ハンドイルカの低周波成分を除き、イルカのような広帯域の音波を送受信可能である。

次に、送波器と受波器の指向特性を Fig. 3-7に示す。広帯域の送波器 (受波器) であるため、周波数を50 kHz から130 kHz の間で変えて測定しており、周波数により指向性関数が異なる。また、測定結果によるビーム幅 (- 3 dB) は、

	送波器	受波器
50kHz	19.2°	19.5°
70kHz	14.1°	13.9°
100kHz	9.6°	9.5°
130kHz	7.7°	7.1°

である。

Fig. 3-8に、信号発生器で発生させた基の波形と、送波器と受波器を2m 離して対向させて収録した、3種類のソーナー音の入射波を示す。どの波形も、信号発生器で発生させた基の波形 (左) と入射波の波形 (右) が異なっている。これは、送波と受波のシステムの周波数特性の影響を受けているためである。対象

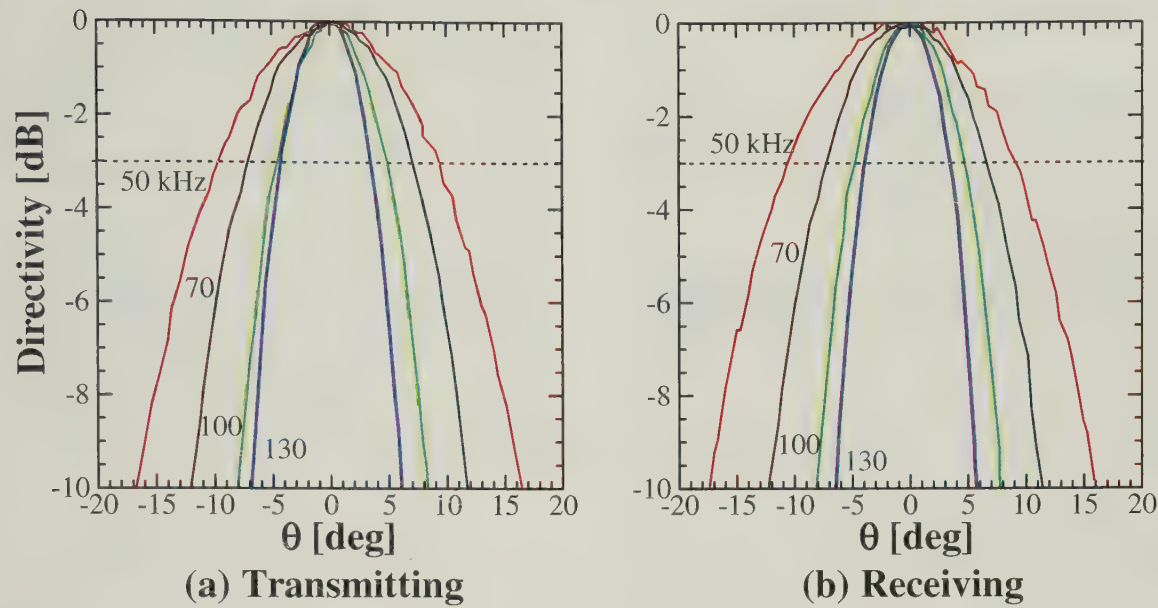


Fig. 3-7. Directivities of the transducers, the transmitting (a), the receiving (b). Dotted lines show -3dB level.

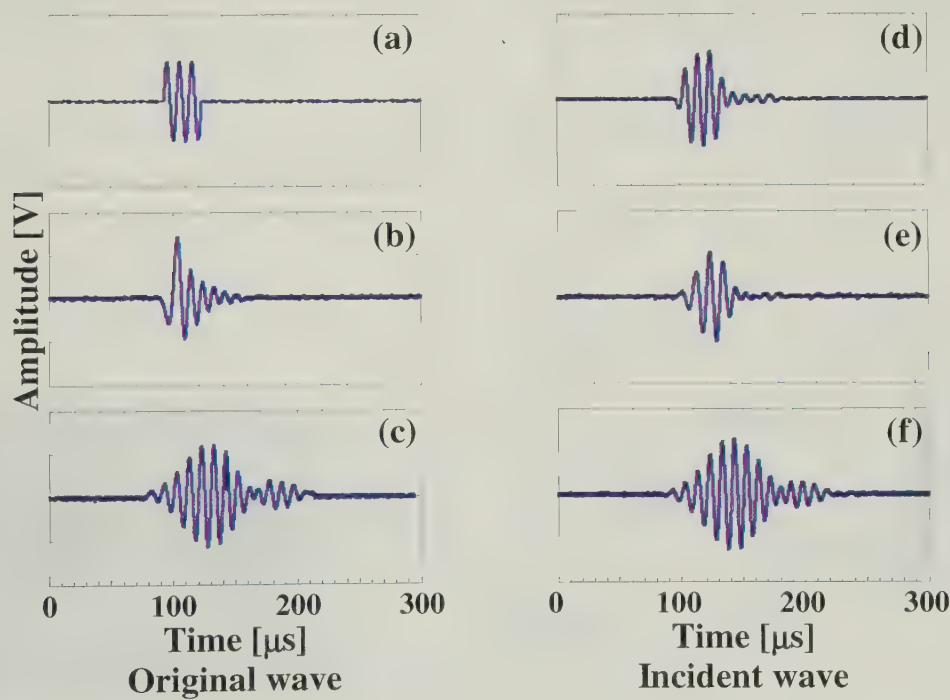


Fig. 3-8. Original waveforms of sonar sounds used: tone burst wave (a), bottlenose dolphin (b), and finless porpoise (c). Incident waveforms obtained by setting the transducers face to face: tone burst wave (d), bottlenose dolphin (e), and finless porpoise (f).

の反射特性のみを測定するためには、このようなシステムの周波数特性をキャンセルする必要がある。

3.6 金属球の形状関数の測定

本節では、実際に金属球からの反射波と入射波を測定し、形状関数を求め、理論値と比較し、方法と実験システムを確かめ、次章からの魚のTSスペクトルの測定に備える。

Fig. 3-9に実験の概要図と用いた金属球の写真を示す。実験は、縦4×横5×深さ3mの淡水の水槽で行った。入射波 (Fig. 3-8 (d), (e), (f)) は、送波器と受波器を対向させ、深さが1.4 m になるように設置して測定した。反射波は、送波器と受波器を極力接近させビーム軸がほぼ同じ方向になるように設置して測定した。金属球は、海水などの外的要因による散乱変化が少なく、計量魚群探知機の較正に用いられる直径が38.1 mm のTC 球と、32.1 mm の銅球の2種類を用いた。

Fig. 3-5において、任意波形発生装置が発生する信号のフーリエ変換を $E_0(\omega)$ 、パワアンプ利得の周波数特性を $G_T(\omega)$ 、送波器の送波感度の周波数特性を $S(\omega)$ 、受波器の受波感度を $M(\omega)$ 、プリアンプ利得を $G_R(\omega)$ 、対象までの距離を r とすると、オシロスコープで観察される対象からの反射波のフーリエ変換 $E_r(\omega)$ は、

$$E_r(\omega) = E_0(\omega) G_T(\omega) S(\omega) D_T(\omega, \theta) \frac{e^{-2(jkr + r\alpha(\omega))}}{r^2} \Gamma(\omega) D_R(\omega, \theta) M(\omega) G_R(\omega) \quad (3.11)$$

となる。ここで、 $D_T(\omega, \theta)$ 、 $D_R(\omega, \theta)$ は、それぞれ送波器と対象までの相対的角度 θ と、角周波数 ω の関数としての送波器と受波器の指向性関数を表し、 α は、海水の吸収係数である。次に送波器と受波器を対向させ、器間距離が r_i になるように設置する。この時オシロスコープで観察される入射波のフーリエ変換は、

$$\frac{E_i(\omega) = E_0(\omega) G_T(\omega) S(\omega) D_T(\omega, 0) \frac{e^{-(jk_i r_i + r_i \alpha_i(\omega))}}{r_i}}{D_R(\omega, 0) M(\omega) G_R(\omega)} \quad (3.12)$$

と表せる。ここで k_i は入射波測定時に使用する音波の波数、 α_i は入射波測定時の海水の吸収係数を表す。(3.11)、(3.12)式の比を取ると $E_0(\omega)$ 、 $G_T(\omega)$ 、 $S(\omega)$ 、 $M(\omega)$ 、 $G_R(\omega)$ が消去され、

$$\frac{E_r(\omega)}{E_i(\omega)} = \frac{D_T(\omega, \theta) e^{2(jkr + r\alpha(\omega))}}{D_T(\omega, 0) \frac{e^{-(jk_i r_i + r_i \alpha_i(\omega))}}{r_i}} \frac{\Gamma(\omega) D_R(\omega, \theta)}{D_R(\omega, 0)} \quad (3.13)$$

となる。水槽実験においては、送波器と受波器の正面に対象を設置できるので、送波、受波の指向性関数は1とみなせる。また、測定は淡水水槽で行ったため吸収係数の項は1となる。したがって、この式を散乱振幅 $\Gamma(\omega)$ について整理すると、

$$\Gamma(\omega) = \frac{E_r(\omega)}{E_i(\omega)} \frac{r^2}{r_i} e^{j(2kr - k_i r_i)} \quad (3.14)$$

となり、送受波システムの機器特性に依存しない対象の散乱振幅を測定できる。これが送受分離システムの

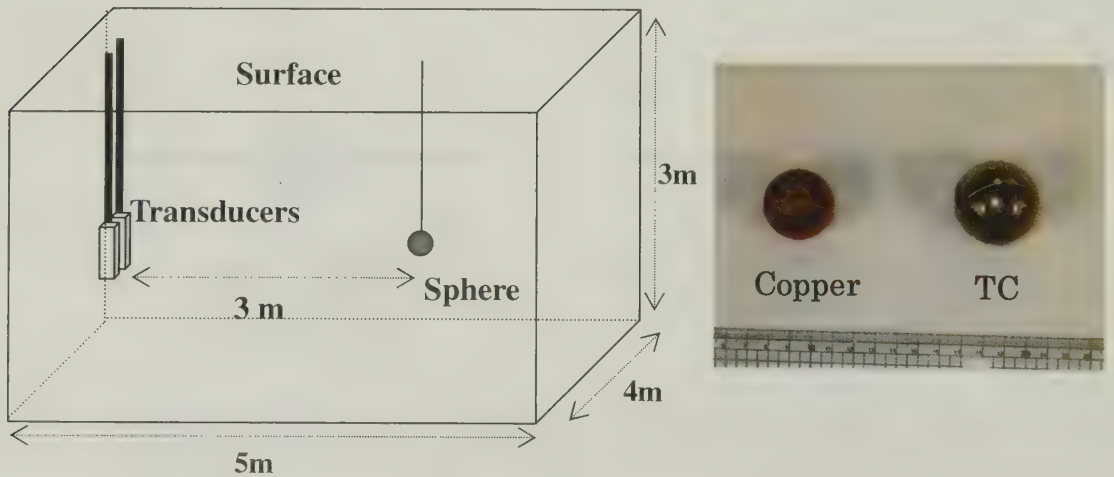
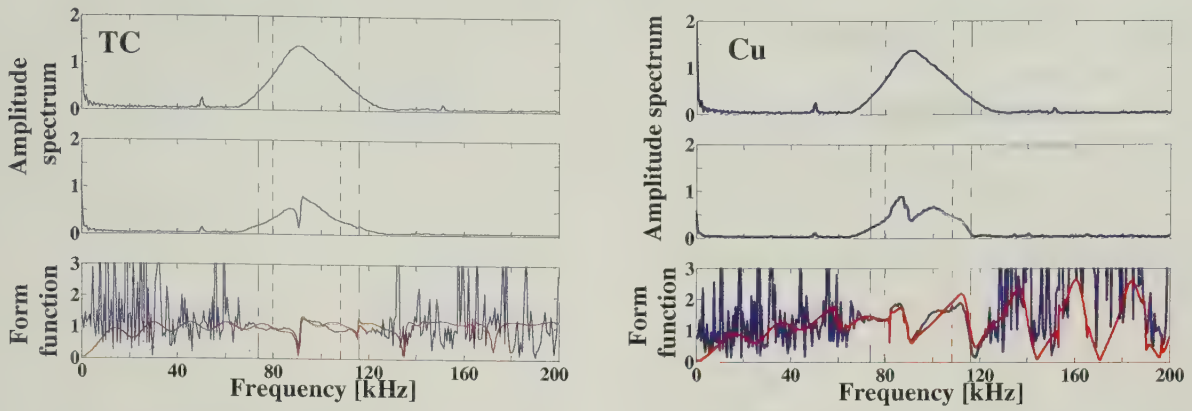
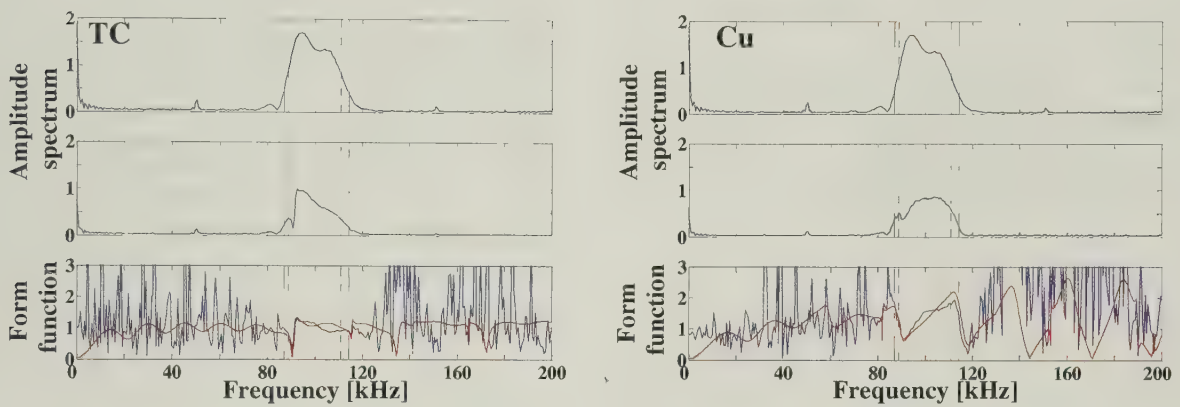


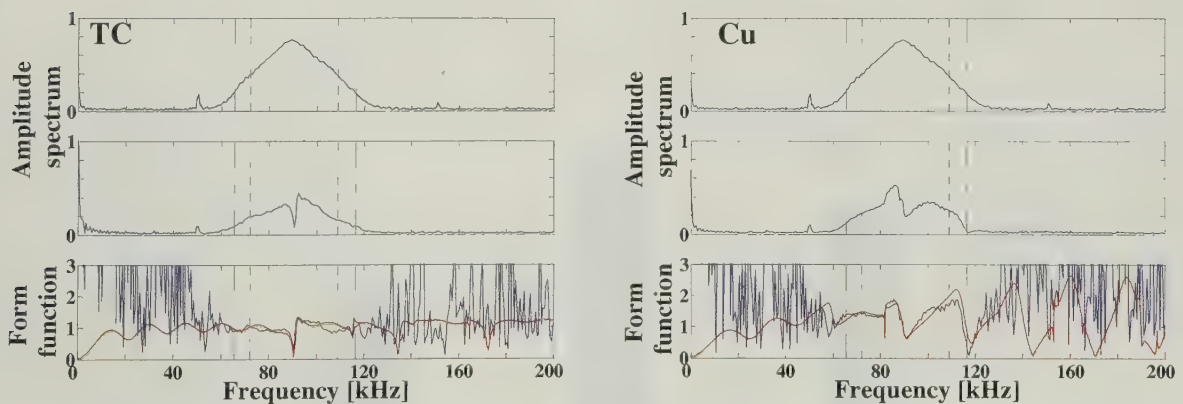
Fig. 3-9. Schematic diagram of measurement of reflected wave from spheres. Sphere used are from copper ($\phi=32.1\text{mm}$), and tungsten carbide ($\phi=38.1\text{mm}$).



(a) Tone burst wave



(b) Finless porpoise sound



(c) Bottlenose dolphin sound

Fig. 3-10. The form functions of tungsten carbide (left) and copper (right) spheres measured by tone burst wave (a), finless porpoise sound (b), and bottlenose dolphin sound (c). Amplitude spectrum of incident wave (upper), reflected wave (middle), and measured (lower, blue line) and theoretical (lower, red line) form functions. Dotted lines and dotted-dashed lines show -3dB and -6dB bandwidths of incident waves, respectively.

大きなメリットである。また、(3.1)式で示したとおり、散乱振幅 $I(\omega)$ を球の半径で規準化することで、形状関数を算出できる

金属球の形状関数の理論値算出において、水中の音速は、反射波測定時の水温を測定し、Mackenzieの式を用いて音速を算出した (Foote, 1983)。反射波と入射波を、サンプリング周波数 5 MHz で、100 ピング測定した。

Fig. 3-10にハンドウイルカ、スナメリ、3サイクル短バースト波を用いて測定した、銅球、TC球の形状関数の理論値と実測値を示す。すべてのソーナー音と2種の金属球で、入射波のスペクトルの-3 dB、-6 dB帯域内で、形状関数の理論値と実測値が良く一致している。一方、-6 dB帯域の外では、信号対雑音比 (SN 比) が低いため、理論値と実測値が一致しなくなる。

ソーナー音ごとに理論との一致を評価するために、理論値と測定値のRMS誤差を調べる。測定した規準化散乱振幅と理論散乱振幅の絶対値を $|f_m(ka)|$ 、 $|f_t(ka)|$ とすると、測定値のRMS誤差 Δ は

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{\beta - \alpha} \int_{\alpha}^{\beta} (|f_m(ka)| - |f_t(ka)|)^2 d(ka)} \quad (3.15)$$

で測ることができる (今泉ら, 2006)。ここで α と β

はそれぞれ各ソーナー音の-3 dB帯域の下限と上限の ka を表す。Fig. 3-11に、3種類のソーナー音に対して、TC球と銅球のRMS誤差 Δ の100ピングについての平均値と標準偏差を示す。図中にはソーナー音の帯域幅も示した。誤差は、ソーナー音や金属球種類に関係なくほぼ0.1であり、形状関数の幾何領域での平均的な値1.0に比べると小さく、高精度の測定ができている。

3.7 結 言

本章では、イルカのような広帯域音を用いるTSスペクトルの計測方法の理論と実際について述べ、散乱特性の明確な金属球によりその信頼性を確かめた。

3.2節では、対象の広帯域散乱特性の計測法としてスペクトル比法を提案した。次に、戻り反射に指向性がない金属球の散乱特性 (形状関数) を求める理論計算の方法について3.3節で述べ、3.4節でスペクトル比法をコンピュータ・シミュレーションにより説明した。3.5節で用いた広帯域送受信システムの特徴と、使用したソーナー音の特徴を述べた。3.6節では、実際にイルカのソーナー音を用いて2種類の金属球の形状関数を測定し、理論値と比較したところ、よい一致を見た。

以上により、スペクトル比法と構築したシステムを

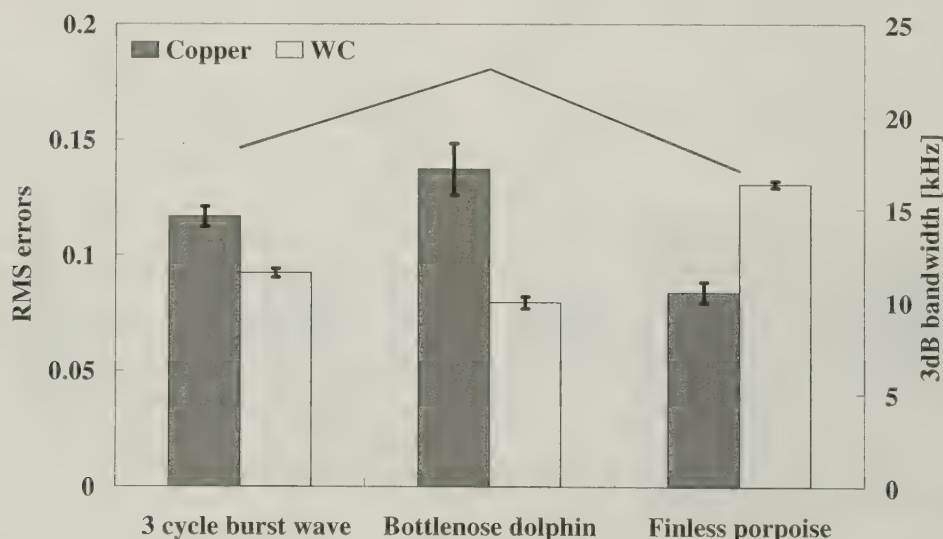


Fig. 3-11. RMS errors (average and standard deviation for 100 pings) of form functions for copper and tungsten carbide spheres using three types of sonar sound. The bold line shows -3 dB bandwidth of the incident wave.

用いて、対象の散乱特性である散乱振幅もしくはTSのスペクトルを精確に測定可能である。

第4章 魚のTSスペクトルの測定

4.1 緒言

前章では、イルカのソーナー音を送受できる広帯域送受信システムを構築して、対象の散乱振幅のスペクトルを精確に測定できることを、散乱特性が理論で明確にできる金属球を用いて確認した。そこで、本章では、この検証された方法とシステムを用いて、魚の散乱特性、すなわち反射強度の周波数特性（TSスペクトル）を測定する。対象に関する情報の1つである魚のTSは、魚種、大きさ（魚体長）、姿勢角、成熟度、深度などにより変化することが知られている（Mukai and Foote, 1997; Mukai and Iida, 1996; Foote, 1980; Miyano et al., 1990）。したがって、本研究では、魚の広帯域のTS、すなわちTSスペクトルを通じて、これらの情報をより精確に推定すること、特に魚種識別のための基礎情報を増やすことを目指す。

魚やプランクトンのTSスペクトルに関する研究も、いくつか行われている。Stantonらは、広帯域音波を用いてプランクトンのTSスペクトルを測定している（Stanton et al., 1998）。また、Reederらによって単一魚種についてはTSスペクトルの測定が行われているが、複数の魚種は測定されていない。彼らは、ニシン科の実験魚（*Alosa pseudoharengus*）をCTスキャンと軟X線により3次元の形状を計測し、広帯域の音響データと比較している（Reeder et al., 2004）。また、音響データと2種類のTSモデルと比較を行っており、連続的な広帯域の周波数特性を有した音響データは、モデルを利用したTSの推定に大きく寄与すると考察している。

本章では、まず4.2節で麻酔をかけ懸垂した複数の魚種の魚のTSスペクトルを、広帯域のイルカの音波を用いて水槽において測定し、イルカのソーナー音の有効性を確かめるとともに、魚のTSスペクトルの特性を検討する。次に4.3節で、海上において懸垂した生きた魚を、4.4節ではほぼ自然状態に近い状態の魚のTSスペクトルを計測する。さらに、4.5節で自然状態の魚を、通常の魚群探知機と同時に探知し、イルカのソーナー音の高分解能性を確かめるとともに、次の段階としての自然状態TSスペクトル計測へとつなげる。

4.2 水槽における魚のTSスペクトルの測定

魚のTSは、2.3節で述べたように、魚種、大きさ、

姿勢、個体により大きく変動するのが知られている。そこで本節では、魚の姿勢を制御でき、測定対象の魚の大きさや、魚種が明確にわかる水槽において、広帯域のイルカのソーナー音を用いてTSスペクトルを測定する。麻酔をかけた魚をテグスで懸垂し、3種の魚の背方向TSスペクトルを測定する。

また、魚の姿勢角を変化させて背方向TSスペクトルを測定する。最後にTSスペクトル変動に影響を与える要因の検討を行った。

4.2.1 方法

日本近海で一般的な有鰭魚であるマアジ（*Trachurus japonicus*）10尾、マダイ（*Pagrus major*）5尾、マサバ（*Scomber japonicus*）5尾の3魚種のTSスペクトルを測定した。各魚の体長（尾叉長）と体幅をTable 4-1に示す。各魚種内では、ほぼ同じ体長の個体を使用した。最大の尾叉長は、マダイの305 mmであり、第3章で使用したTC球の直径の10倍程度である。大きい魚でも魚体全体が送波ビームの中に入るように、送受波器から魚体の懸垂具までの距離を決めた。

Fig. 4-1に、魚のTSスペクトル測定実験の方法と実験に使用した魚の写真を示す。淡水の水槽（5 × 4 × 3 m）で、麻酔をかけた魚をテグスでビーム軸付近に懸垂した。用いた麻酔は、魚類・甲殻類用の麻酔（田村製薬、FA100）を5,000倍に希釈して使用した。魚を懸垂する際、音響資源調査で一番重要な魚の背方向TSを測定するために、魚が横向きになるよう懸垂し、送波、受波のビームの開きを考慮して、魚までの距離を3 m以上離して、測定を行った。用いたソーナー音は、前章とおなじハンドウイルカ、スナメリ、短バースト波の3種類である。各ソーナー音で100ピング（全体で50 s）の反射波を測定し、振幅スペクトルを求め、前章で示した（3.3）式と（3.14）式を用いてTSスペクトルを算出した。測定の直前に、TC球を用いてビーム軸位置を探り、そこに魚体が来るように位置調整した。淡水水槽なので、吸収係数 α は無視でき、測定対象を正面に設置できるので、送波と受波の指向性関数 $D_T(\omega, \phi)$ 、 $D_R(\omega, \phi)$ は、1とみなせる。受信信号はサンプリング周波数5 MHzでデジタル信号とした。

麻酔をかけた1尾のマダイの姿勢角を変え、音波の入射角の違いによるTSスペクトルの変化を測定した。Fig. 4-2に姿勢角の定義を示す。魚体の体軸に対して音波が垂直に入射する場合を0°とし、頭が下がっている状態をマイナス、頭が上がっている状態をプラスとして、10°おきに±180°のTSスペクトルを100

Table 4-1. The fork length and body breadth of fish used in the experiment. The averages value and standard deviations, were calculated for each species.

Species name	Sample no.	Fork length [mm]	Body breadth [mm]	Avg. fork length [mm] (SD)	Avg. body breadth [mm] (SD)
Horse mackerel	1	220	31	207.6 (3.0)	28.8 (0.4)
	2	203	28		
	3	197	27		
	4	208	30		
	5	225	30		
	6	196	27		
	7	207	28		
	8	204	29		
	9	201	29		
	10	215	29		
Sea bream	1	300	46	296.2 (4.7)	45.4 (0.9)
	2	305	48		
	3	285	43		
	4	285	44		
	5	306	46		
Chub mackerel	1	252	41	256.0 (5.1)	41.4 (1.2)
	2	254	43		
	3	250	38		
	4	276	45		
	5	248	40		

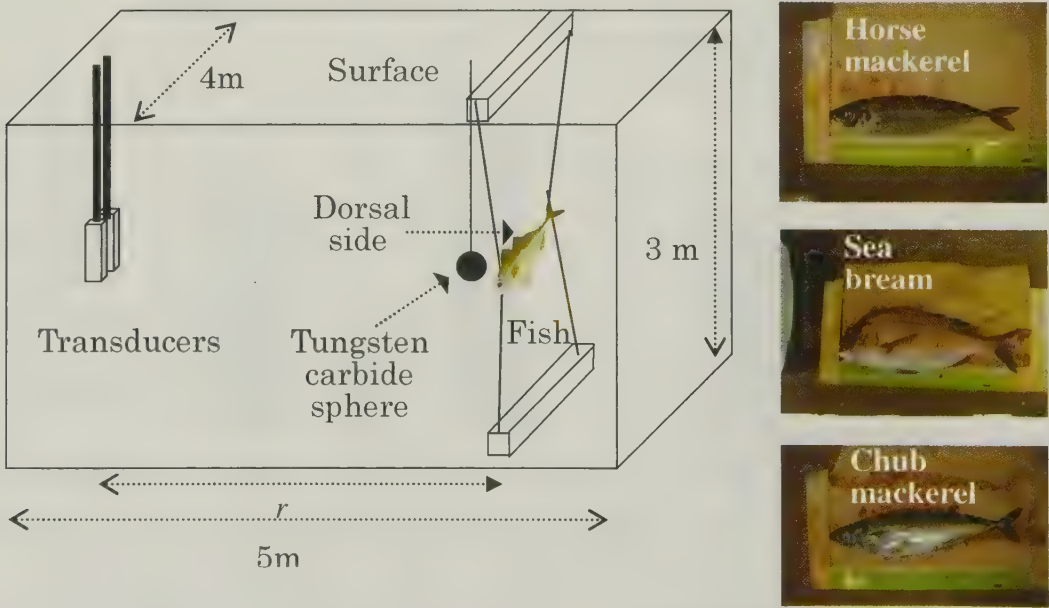


Fig. 4-1. Measurement system of fish TS spectra in tank (left side). Three 3 species of fish are used in the experiment; horse mackerel, sea bream, and chub mackerel (right side).

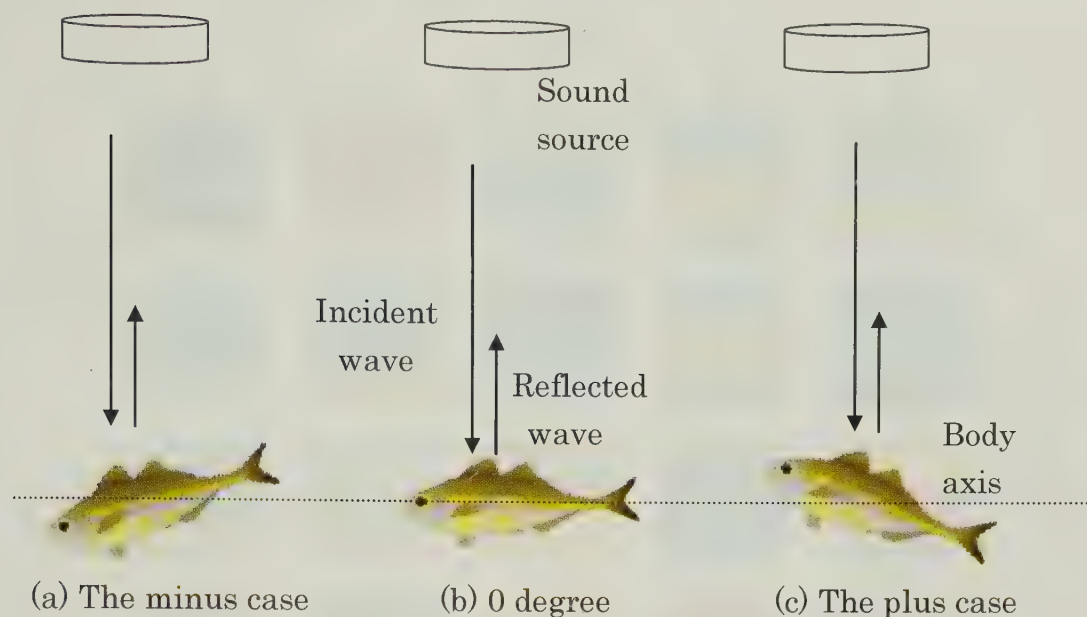


Fig. 4-2. The definition of fish orientation. The sound wave is perpendicular to the body axis of the fish (b), with minus degrees for the fish tail-on (a), and plus degrees for the fish head-on (c).

ピング測定した。

4.2.2 結果と検討

Fig. 4-3に、代表として一番広帯域の特性を有したハンドウイルカのソーナー音を用いて測定した100ピング分の3魚種のTSスペクトルを示す。他のソーナー音を用いても、各ソーナー音の入射波の-6 dB帯域内では、TSスペクトルは、ほぼ同じ値を示した。100ピング(50s)の間に麻酔が効いていたほぼすべての魚では、TSスペクトルの変動はほとんど無かった。しかし、2尾(アジ H-5、マダイ C-5)が途中で麻酔から覚め、激しく動き出したため、TSスペクトルが変動した。そこで、麻酔から覚める前を平均したTSスペクトルをFig. 4-4に示す。結果の平均TSスペクトルは、体長がほぼ等しいにもかかわらず、同じ魚種内でもかなり個体差があり、魚種毎の特徴はつかめない。

これらの変動が一般的なものであるかを、過去のデータと比較して検討する。Fig. 4-5に、周波数70 kHzと100 kHzでのTS値を体長で規準化した、規準化TS(TS_{cm})を示す。規準化TSは、魚のTSが体長の2乗に比例するとした簡易モデルの係数であり、魚体のcm単位での尾叉長を L とすると、

$$TS_{cm} = TS - 20\log L \quad (4.1)$$

と表される(Miyanohana *et al.*,1990; Furusawa,

1988)。図のように今回の結果は、一般的な有鰭魚の背方向平均TSの規準化TSの値-66.0dB付近の値(Miyanohana *et al.*,1990; MacIennan and Simmonds, 1992)となり、妥当な結果である。1尾のマサバの規準化TSが70 kHzで約-83 dBと小さいが、これは、元のマサバのデータ(Fig. 4-4 C-4)でわかるように、75 kHzで丁度TSの値が落ち込んでいるためである。

次に、尾叉長が285 mmのマダイについて、音波の入射角を変えて測定した100ピング分の結果をFig. 4-6に示す。姿勢角を変えるとTSスペクトルも大きく変動する。過去のデータと比較を行いやすいように、自然状態の魚の一般的な姿勢角と思われる $\pm 30^\circ$ で、魚が動いていない100ピング分を平均したTSスペクトルをFig. 4-7に示す。宮野鼻らは50, 70, 100, 200 kHzの4周波を用いて、複数の魚種について姿勢角によるTSの変動を測定した(Miyanohana *et al.*, 1990)。その結果のうち、本実験とほぼ同じ大きさのマダイについての100 kHzのTSの値を比較したところ、Fig. 4-8のように今回測定した結果と傾向が大体合った。宮野鼻らの実験においても、個体ごとに姿勢角によるTS値の大きな変動が確認されている。

ここで、姿勢角や魚種などの違いにより、TSスペクトルに特徴が現れるかを調べるために、TSスペクトルの変動要因を検討する。本実験で得られたTSスペクトルの変動要因は、魚種、魚体長、姿勢角、個体差があげられる。魚体長は魚種内ではほぼ同じ体長を用

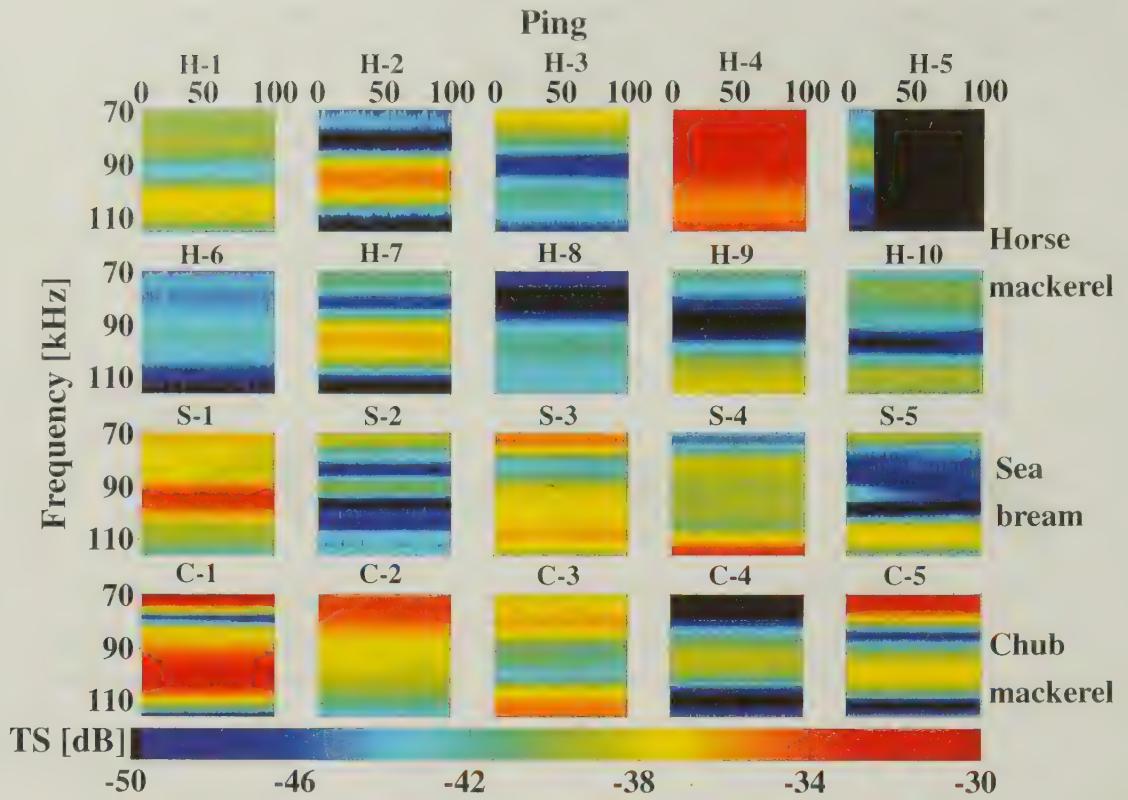


Fig. 4-3. Measured TS spectra in 100 pings (50 s) of horse mackerel (H-1 to H-10), sea bream (S-1 to S-5), and chub mackerel (C-1 to C-5). The x axis shows ping number, the y axis shows frequency, and the color shows TS value.

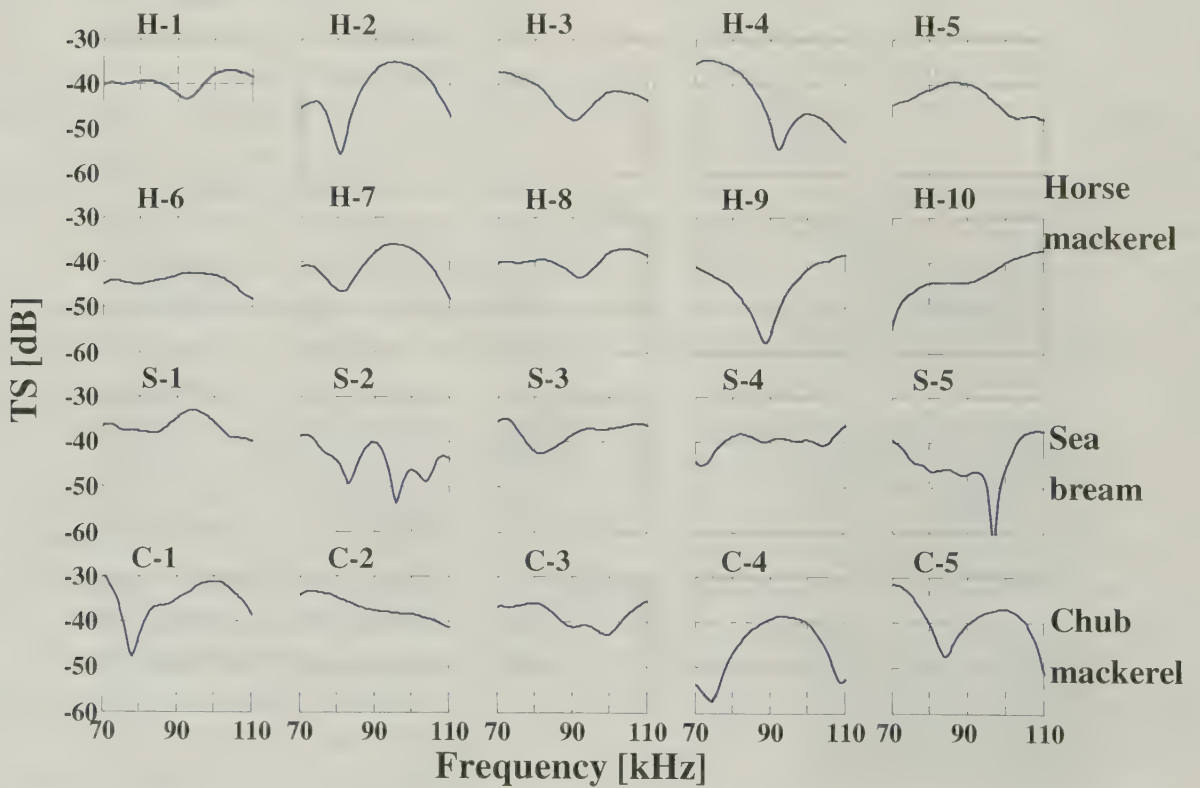


Fig. 4-4. Measured TS spectra of horse mackerel (H-1 to H-10), sea bream (S-1 to S-5), and chub mackerel (C-1 to C-5). The x axis shows frequency, the y axis shows TS value.

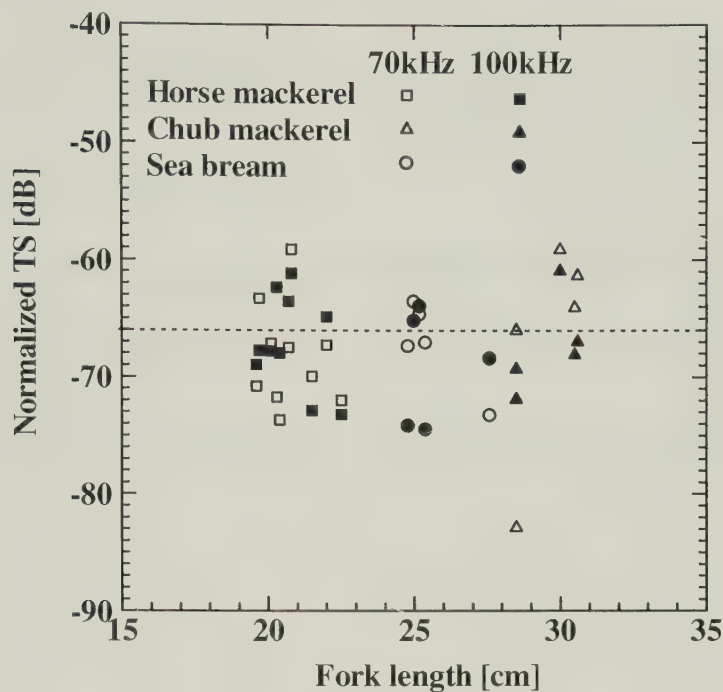


Fig. 4-5. Normalized TS at 70 kHz and 100 kHz for three species of fish. Dotted line at -66 dB shows standard value of normalized average TS.

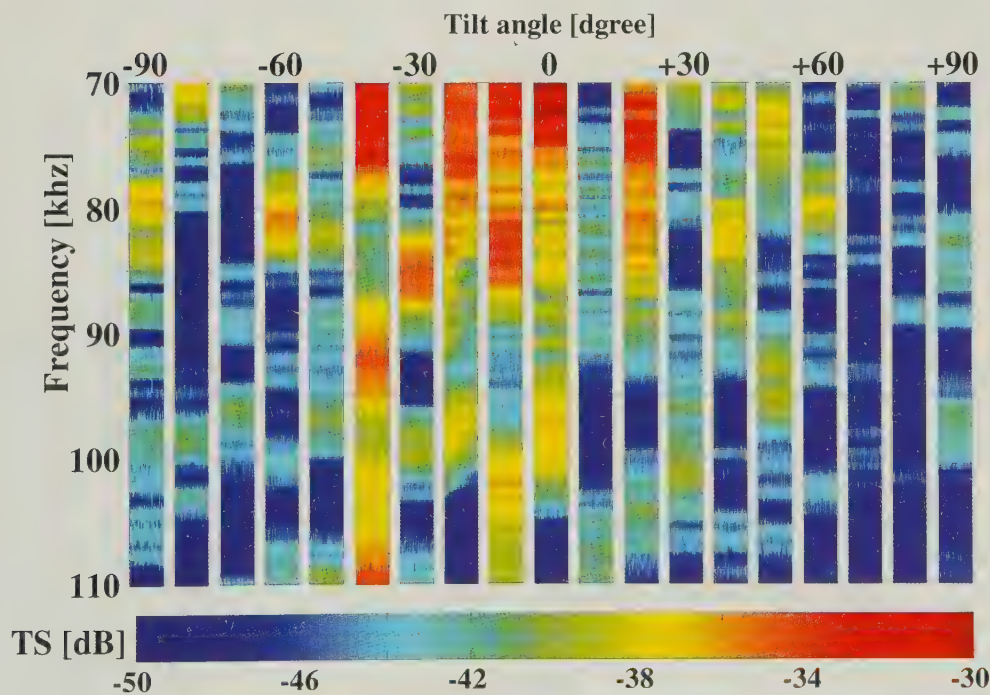


Fig. 4-6. Variation of TS spectra in 100 pings of a sea bream by changing tilt angle from +90 deg (right) to -90 deg (left). The x axis shows the tilt angle of the fish (sea bream), the y axis shows frequency, and the color shows TS value.

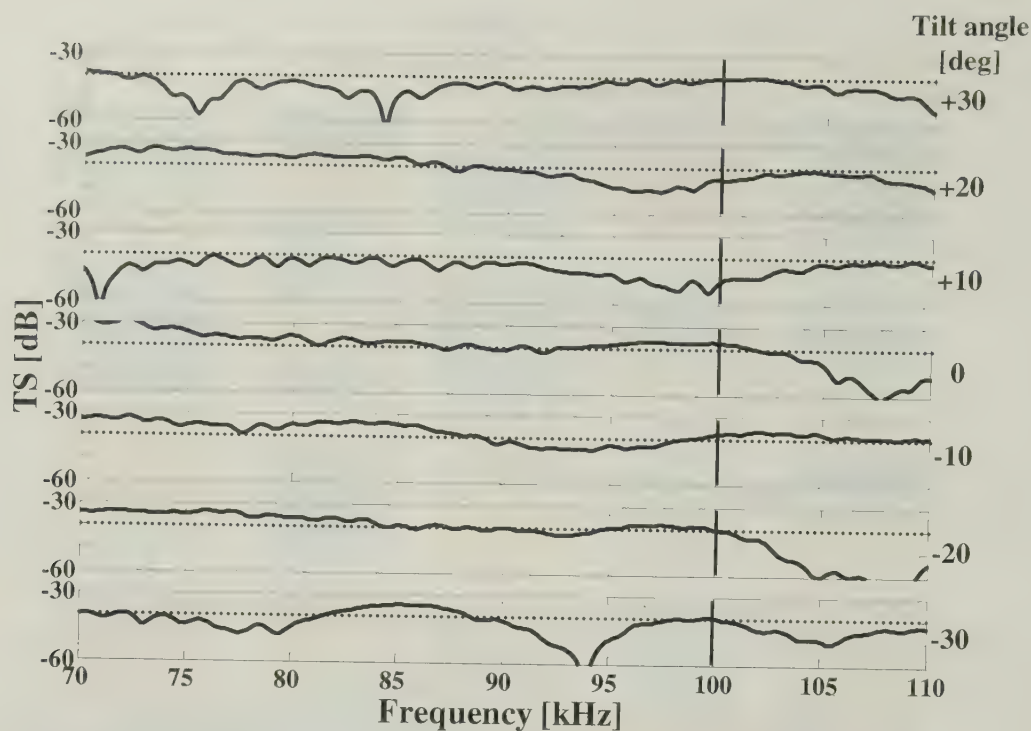


Fig. 4-7. Variation in TS spectra of a sea bream by changing the tilt angle from $+30^\circ$ (top) to -30° (bottom). For comparison purpose, -40 dB grid lines are shown. The TS values at 100 kHz shown by solid lines are used for Fig. 4-8.

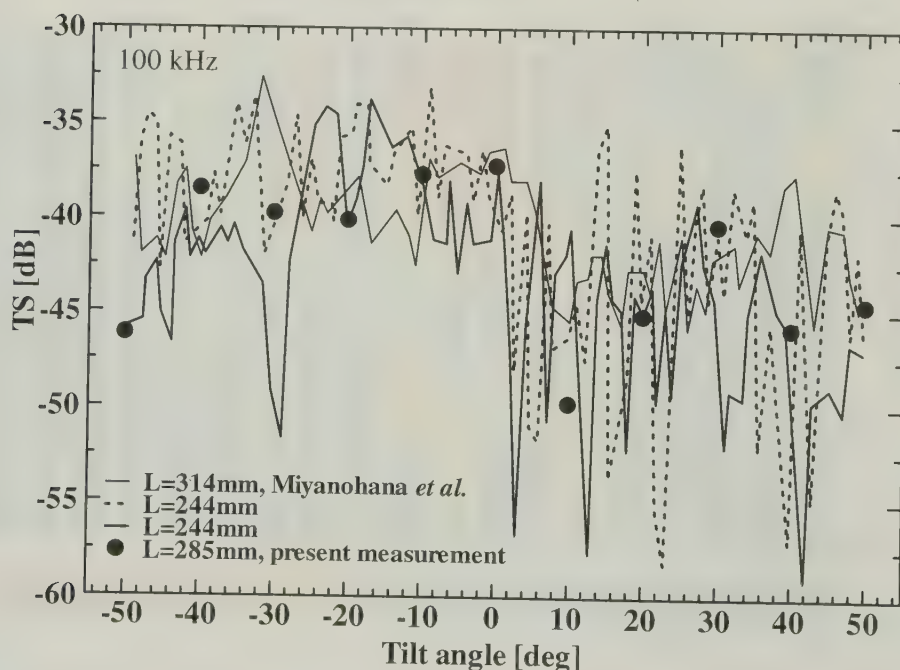


Fig. 4-8. Comparison of the dependence of TS on the tilt angle for sea bream of similar size at 100 kHz. Lines are from Miyanoohana *et al.* (1990). and the black circles denote the measured TS from this study.

いているので考慮せずに、姿勢角による変動と魚種毎の個体間変動を考える。今、TS スペクトルのデシベル値における標準偏差 SD を

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{TS_i(\omega) - \overline{TS(\omega)}\}^2}, \quad (4.2)$$

と定義する。ここで、 $TS_i(\omega)$ は、魚種の影響を考える場合、各実験魚の TS スペクトルを、姿勢変動による影響を考える場合は、ある姿勢時の TS スペクトルを表す。また、 $\overline{TS(\omega)}$ は、同一魚種の TS スペクトルの平均、または、姿勢角変動に対する TS スペクトルの平均である。 n は、魚種の影響を考える場合、各実験魚種の個体数（マアジ10、マダイ5、マサバ5個体）である。姿勢角変動の影響を考える場合、自然状態の魚の姿勢角に近い -30° から $+30^\circ$ までの 10° ごとの値を用いたので、 n は7である。Fig. 4-9に TS スペクトルの標準偏差を示す。マダイの TS スペクトルにおいて、97 kHz 付近に大きなピークがあるが、これは元のマダイ (Fig. 4-4 S-5) の97 kHz 付近の TS の値が著しく低いためである。マダイの姿勢角による変動の標準偏差において、71.0, 75.5, 84.5, 108.0kHz でピークが見られるが、これらも元の TS の値が著しく変動しているためである (Fig. 4-7)。逆に、姿勢角変動において、89 kHz の標準偏差の値が

低くなっており、これは元の TS の値が約 -40 dB からである。これらの点を考慮に入れると、TS スペクトルの標準偏差の平均的な値は、4 dB 程度であり、姿勢角や魚種による著しい TS スペクトルの違いは見当たらない。つまり、姿勢変化によっても、魚種によっても TS スペクトルが大きく変動し、著しい違いが見られないことから、TS スペクトルの変動のみで、種の特定には至らないことを示唆している。

魚の TS スペクトルは、魚種、魚体長、姿勢角、個体差などのパラメータを含んだ関数である。特に自然状態では、魚の遊泳時の姿勢角変化が、連続の TS スペクトルの変動として得られると考えられる。また、本実験で得られた TS 値は既往の研究とほぼ一致しており、精確である。時間的に短く、広帯域の音波を用いて、自然状態の魚の TS スペクトルを測定できれば、密な群れから得られる群体エコーを単体エコーの集まりとして分解でき、自然状態の魚の TS 測定限界の緩和に繋がる。また TS スペクトルにより、魚体長推定、姿勢角推定の情報も同時に得られるため、魚種識別の基礎情報の増加に繋がると結論付けられる。

本節において、イルカの広帯域のソーナー音を用いて3魚種の TS スペクトルを実験的に測定した。ソーナー音を変えても、各ソーナー音の入射波の -6 dB 帯域内では、TS スペクトルは、同じ値を示した。ま

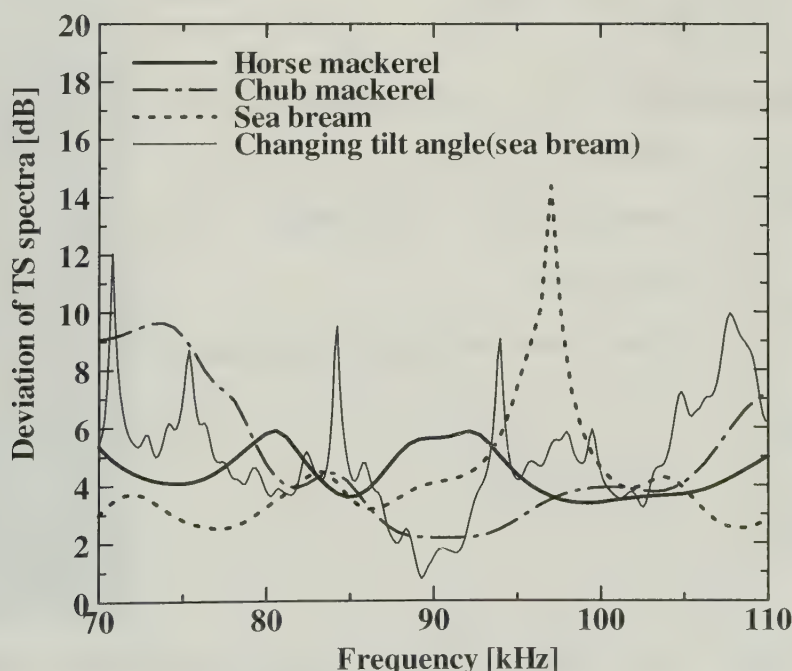


Fig. 4-9. Variation in TS spectra measured by the standard deviation for different individuals and tilt angles. The standard deviation for the tilt angle is calculated in 10° steps from $+30^\circ$ to -30° .

た、魚の TS スペクトルは、魚種、大きさ、姿勢角により大きく変動するが、測定結果は既往の研究とほぼ一致、または同じ傾向を示した。魚種、姿勢角による TS スペクトルの変動は、ほぼ同じ程度であることから、TS スペクトルのみでの魚種識別は難しいことが示された。しかしながら、魚の動きによる TS スペクトルの変動が得られ、連続的に TS スペクトルを得ることができれば、魚の姿勢変動による TS スペクトルの変動を得られることが示唆された。そこで次に、海上において魚の TS スペクトルを測定する。

4.3 海上における懸垂した魚のエコーストレングスの測定

前節で実際の魚の TS スペクトルを水槽で精確に測定した。自然状態の魚の TS スペクトルを連続的に得られれば、姿勢変動などの動きによる TS スペクトル変化を得られると考えられた。そこで、本節では、自然状態の魚の TS スペクトルを測定することを最終目的とし、その基礎段階として、麻酔をかけ懸垂した魚に対して海上で音波の送受波実験を行う。

前節までは淡水の水槽で実験を行ったが、本章では海洋で実験を行う。海洋は複雑な構造をしており、様々な種類の塩が溶解しており、波があり、流れがある。また、水温、深度、塩分濃度によって水中音速が異なり、音波伝播の課程においては、音波の吸収がおきる。海洋での音波の伝播損失は、拡散減衰と、吸収減衰によって支配されている。拡散減衰は、音源から音波が伝

播するにしたがい、幾何学的にそのエネルギーが減衰することを意味している。これに対して、吸収減衰は海水中に含まれる硫酸マグネシウム分子によるイオン緩和現象などが原因であるといわれ、エネルギーは距離に比例して減衰する。このため、伝播距離が長くなると、この吸収減衰による影響が無視できなくなる。

吸収減衰についての研究は、実験室、実海域において現在までに様々行われ、これらの検討結果から、200 kHz 以上の周波数では、温度による吸収減衰が支配的であり、10~200 kHz では、海水中の硫酸マグネシウムによる影響が加わることが判っている。本研究で用いるイルカの音波は200 kHz 未満で広帯域の音波である。そこで、海水の吸収減衰を考慮する必要がある。吸収減衰の算出方法は、一般に Schulkin and Marsh, Thorp, および Francois and Garrison の式がある。これらの値は互いに一致しない。許らは、海中における鉛直方向の音波の減衰を精確に調べ、鉛直方向では Francois and Garrison の式を用いて、全深度で平均化した吸収係数の利用を薦めている（許ら、1990）。Fig. 4-10に Francois and Garrison の式を用いて算出した吸収係数を示す。Francois and Garrison の式は、周波数、深度（圧力）、水温、塩分濃度、イオン濃度の関数として表せる。これを用いて本研究では、広帯域の吸収係数を補正し、魚の TS スペクトル測定を試みる。

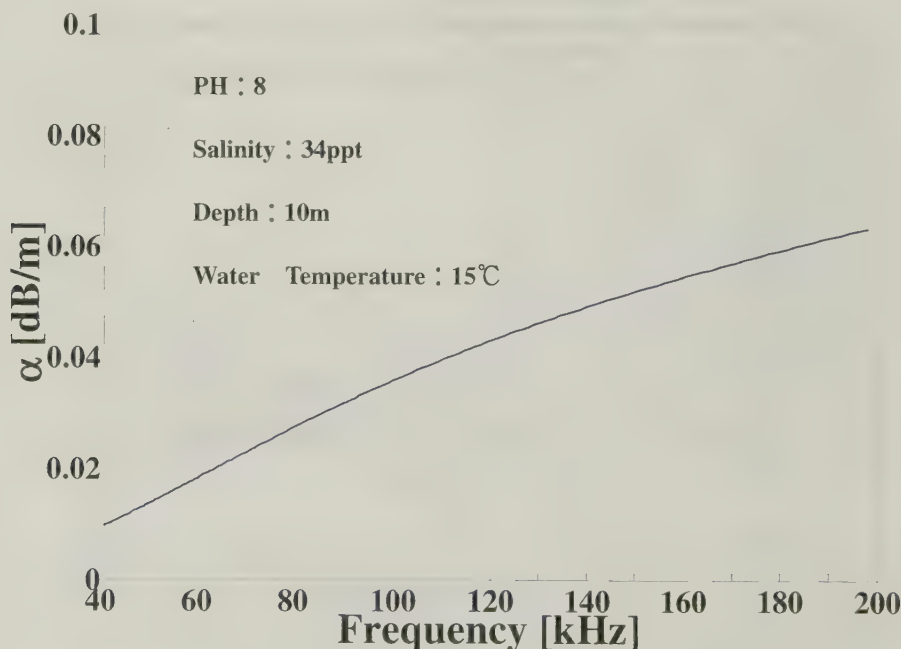


Fig. 4-10. Absorption of sea water calculated by Francois and Garrison equation.

4.3.1 方 法

本節では、麻酔をかけて懸垂した魚からの反射波を海上で測定した。実験は、東京海洋大学の実習艇「ひよどり」を用いて、千葉県館山湾沖で、2005年8月に行った。錨泊した船の舷側に送波器と受波器を設置した。Fig. 4-11に懸垂具を示す。塩化ビニルパイプとテグス、TC 球、錘を組み合わせ、懸垂具を作成し、中央に魚体があるように魚を懸垂した。また、魚の背方向 TS を測定するために、背鰭に浮きをつけ魚の姿勢を制御した。魚は尾叉長が14.6 cm の麻酔をかけたマアジ (*Trachurus japonicus*) を使用し、ハンドウイルカ、スナメリ、短パースト波の3種類のソーナー音を用いて測定を行った。用いたシステムは、第3章で用いたものと同じであり、サンプリング周波数を1 MHz で収録した。

水槽実験では、送受波器の正面に測定対象である金属球や、魚を設置でき、(3.13) 式の指向性関数は1とみなせたが、海上実験では対象がビーム内のどこにいるかがわからない。本実験で用いた受波器はシングルビームのもので、指向性関数を補正することは、何らかの方法を用いないと出来ない。そこで本節では、懸垂具に吊るした TC 球の形状関数を測定し、対象の

散乱特性を精確に得られているかを確認した上で、指向性関数を補正していない生の TS スペクトル((3.13) 式の $D_T(\omega, \theta) \Gamma_s(\omega) D_R(\omega, \theta)$ であり、エコーストレングススペクトルと呼ぶ)を計測した。

4.3.2 結果と検討

Fig. 4-12にハンドウイルカのソーナー音を用いて得られたエコーグラムを示す。ハンドウイルカのソーナー音の継続時間は、約 $30 \mu\text{s}$ と時間的に非常に短いので、浮き、パイプ、TC 球、魚体のすべてのエコーを分離できているのが確認できる。また、深度方向に上下しており、船の揺れの影響を受けている。送受波器と魚体の相対的位置が正確にわからないので、このエコーグラムの中で TC 球の反射波信号の電圧が最大値をとる時が、送受波ビームの主軸付近に懸垂具全体があると仮定し、TC 球と同時に測定された魚からの1ピング分の反射波を解析した。得られた TC 球と魚からのエコーを切り出し、海水の吸収係数による補正を行った。補正を行った反射波と、前章で測定した入射波を用いて TC 球の形状関数と、魚のエコーストレングススペクトルを求めた。本実験では、TC 球までの距離が水槽実験の時よりも離れているため、良い

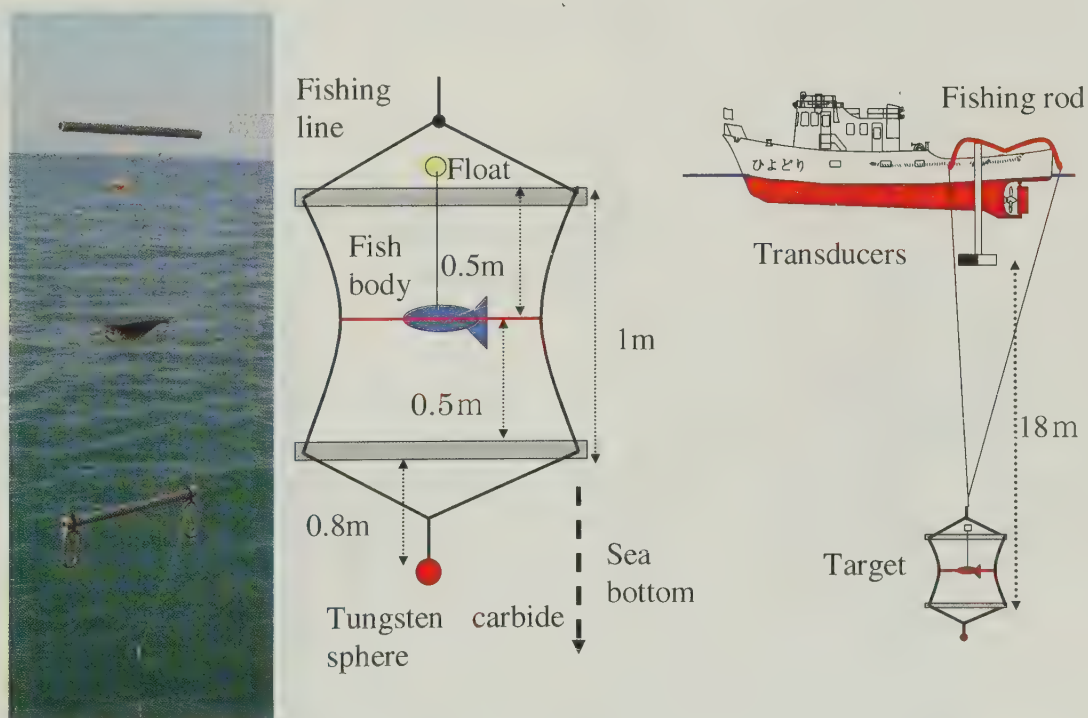


Fig. 4-11. Schematic diagrams of measurement set up of tethered fish at sea.

SN比を得られなかった。しかし、TC球の反射波信号の電圧が最大値の時に得られた形状関数は、理論値と一致し、対象の精確な散乱特性が得られるのを確認した。

Fig. 4-13に3種類のソーナー音を用いて測定したエコストレングススペクトルを、(4.1)式を用い

てマアジの体長で基準化した規準化TSを示す。比較を行いやすいように、一般的な有鰭魚の姿勢平均基準化TSの値 -66 dBを点線で示した。短バースト波を用いて測定した時の結果は、 100 kHzの規準化TSの値が、一般的な有鰭魚の規準化TSの最大値である約 -60 dBであり、妥当な値を得た。しかし、短バース

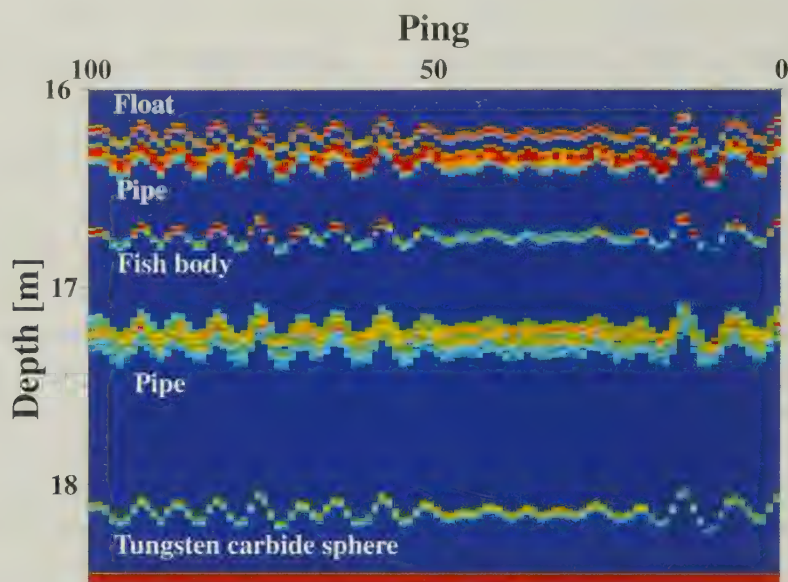


Fig. 4-12. The echogram of the targets using bottlenose dolphin sonar signal. The x axis shows ping number (50 s), y axis shows depth, and color shows intensity of the target.

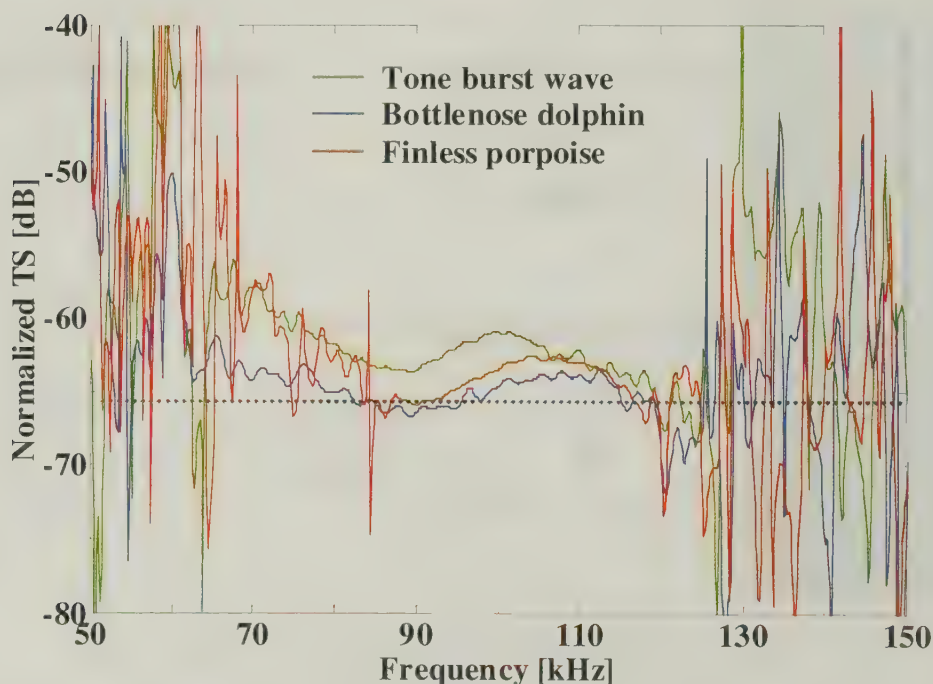


Fig. 4-13. Normalized TS of the suspended horse mackerel (fork length =14.6cm) using 3 sonar signals at sea. The dotted line shows -66 dB.

ト波を用いた時と、ハンドウイルカ、スナメリのソーナー音を用いて測定した規準化 TS を比較すると、100 kHz の時に約 5.0 dB 異なっている。同一個体の魚を測定しているにもかかわらず、3 種類のソーナー音で得られた規準化 TS の値が異なるが、同じ懸垂具に吊るした TC 球の形状関数は、理論値とよくあっていることから、ハンドウイルカ、スナメリのソーナー音を用いて測定した時に、懸垂具が流れの影響を受け、魚の姿勢が変化し、エコーストレンジススペクトルに影響したと考えられる。

以上、本節では海水の吸収係数を補正し、麻酔をかけ懸垂具に吊るした魚のエコーストレンジススペクトルを測定した。この時、懸垂具の一部である TC 球の形状関数を測定し、対象の散乱特性を精確に得られているのを確認した。しかし、エコーストレンジススペクトルは、指向性関数の影響を含んでおり、指向性関数補正を行わなければ、流れのある海で、自然状態つまりは姿勢変化や動きを伴った魚の精確な TS スペクトル測定は困難である。そこで、次節で TC 球を利用して指向性関数の補正を試みる。

4.4 準自然状態の魚の TS スペクトルの測定

自然状態の魚の TS スペクトルを連続で精確に測定するためには、指向性関数を補正する必要がある。そこで本節では、TC 球を利用して、指向性関数補正を試み、魚の TS スペクトルを測定する。第 3 章で述べたとおり、金属球は、複雑な鰭の構造を持った魚と違い、反射に指向性がなく、その散乱特性が理論的に求められる。本節では、このメリットを利用、つまり TC 球の理論散乱特性を用いて指向性関数を補正し、魚の TS スペクトルを連続で測定する。

4.4.1 方 法

実験は、4.3 節と同様に、実習艇「ひよどり」を錨泊させ、船の舷側に送波器と受波器を設置し、千葉県館山湾沖で、2006 年 8 月に行った。Fig. 4-14 に懸垂具を示す。本実験では、より自然状態の魚に近い TS スペクトルを得るために、生きたままの魚を懸垂した。魚の上下に直径 38.1 mm の TC 球を 2 個懸垂した。TC 球が吊るしてあるテグスを鉛直テグスとし、2 つの TC 球の中間に枝状、もしくは手綱状に魚を吊るすためのテグスを結んだ。魚は生きたままとし、すばやく懸垂し、ほぼ背方向から音波が当たるようにした。送受総合のビーム幅と、それを用いたビームの開きの直径（ビーム直径）は、上の球までの距離が 17.3 m の場合、ビーム直径は、50 kHz で 4.8 m、130 kHz で 1.9 m となり、懸垂具が送受波器の真下に下りてい

れば、対象の球と魚は、ビームの中心付近にある。また、釣り糸から魚体中心までは約 40 cm であるので、TC 球と魚の方向は、ほぼ同じとみなせる。実験に用いた魚は、マアジ 1 尾とイサキ (*Parapristipoma trilineatum*) 2 尾である。実験魚の尾叉長を Table 4-2 に示す。この実験で得られた魚の TS は、ほぼ自然状態に近いので、準自然状態と呼ぶ。

懸垂した魚は送受波のビームの中を泳ぐため、魚の指向性関数を上下に吊るした TC 球のどちらかを用いて補正する。今、魚体中心までの距離を r_f 、魚の散乱振幅を $\Gamma_f(\omega, \theta_f)$ とする。ここで θ_f は魚の姿勢角を表す。これらをそれぞれ (3.11) 式に代入し、得られる反射波のフーリエ変換を $E_{rf}(\omega, \theta_f)$ とする。同様に TC 球までの距離を r_s 、散乱振幅を $\Gamma_s(\omega)$ 、TC 球からの反射波のフーリエ変換を $E_{rs}(\omega, \theta)$ とする。これらの 2 つの反射波のフーリエ変換の比 R_{fs} をとると、球と、魚の方向がほぼ同じとみなせれば、指向性関数をキャンセル出来る。具体的には、

$$\begin{aligned} R_{fs} &= \frac{E_{rf}(\omega, \theta)}{E_{rs}(\omega, \theta)} = \frac{\Gamma_f(\omega, \theta_f) r_f^{-2} \exp[-2r_f \alpha(\omega) + j\omega r_f / c]}{\Gamma_s(\omega) r_s^{-2} \exp[-2r_s \alpha(\omega) + j\omega r_s / c]} \\ &\equiv \frac{\Gamma(\omega, \theta_f)}{\Gamma_s(\omega)} \exp[j\omega / c (r_f - r_s)] \end{aligned} \quad (4.3)$$

と表せる。この式の分母に TC 球の計算で求めた理論値を適用することで、指向性関数をキャンセルし、魚の TS スペクトルを求められる。また、(4.3) 式において、魚と球はほぼ同じ深さにあるとみなせるので、海水の吸収係数もキャンセルできる。魚の細かい動きを測定するために、ソーナー音の送波間隔を 0.2 s とし、サンプリング周波数を 5 MHz で 500 ピング (10 s) の測定を行った。

4.4.2 結果と検討

Fig. 4-15 にハンドウイルカのソーナー音を用いて準自然状態のイサキからの反射波を測定したエコーグラムを示す。TC 球からのエコーは、上下で同じ動きをしており、4.3 節と同じように船の揺れによる影響がある。一方でイサキからのエコーは深度方向に上下に激しく 40 cm 程度を動いており、枝縄の長さとも一致している。得られたイサキのエコーと上の TC 球のエコーを利用して、準自然状態の魚の TS スペクトルを求めた。上下の TC 球からのエコーレベルは同じであり、それらを用いて求めたそれぞれの TC 球の形状関数は理論値と一致した。

Fig. 4-16 にハンドウイルカのソーナー音を用いて求めたイサキの TS スペクトルを示す。92 kHz 付近に連続的に TS の値が著しく低くなっている部分があ

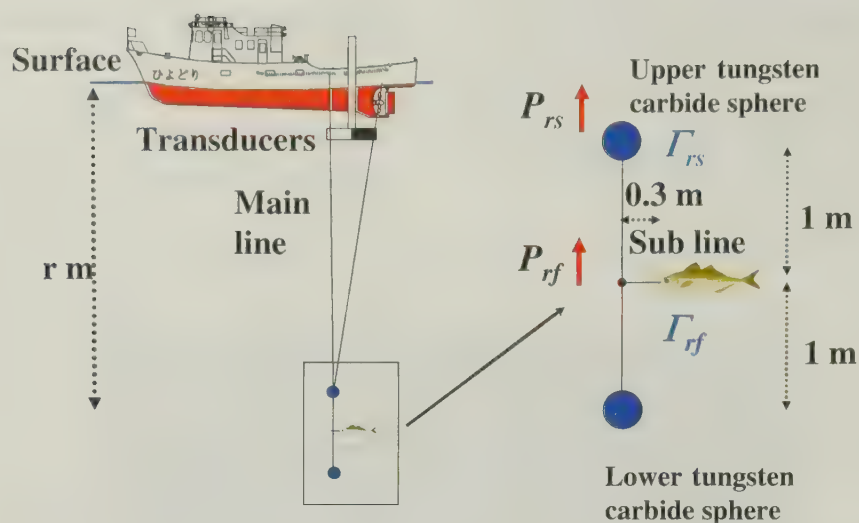


Fig. 4-14. Setup for TS spectra measurement of tethered swimming fish at sea. " P_{rs} " and " P_{rf} " show the amplitude spectra of sphere and fish, " Γ_{rs} " and " Γ_{rf} " show scattering amplitude of sphere and fish, respectively.

Table 4.2. Maximum, average, and normalized TS for three species of fish at 70 and 100 kHz.

Sample		Horse mackerel	Chicken grunt	Chicken grunt
Fork length [cm]		17.5	14.5	15.2
70 kHz	Max. TS [dB]	-35.4	-34.3	-30.9
	Avg. TS [dB]	-50.9	-45.9	-52.8
	TS _{cm} [dB]	-75.8	-69.2	-76.4
100 kHz	Max. TS [dB]	-36.4	-35.2	-35.5
	Avg. TS [dB]	-52.3	-46.9	-52.1
	TS _{cm} [dB]	-77.2	-70.2	-75.7

るが、これは補正に用いた TC 球が約92 kHz で共振特性を持つためである。また、TS スペクトルは、時間（ピング）と共に大きく変動している。この原因を考察するために、Fig. 4-15、4-16の180ピングから205ピング（約5 s）の部分を拡大した図を Fig. 4-17に示す。まずエコーグラムでは、ほとんどエコーレベルは代わらず、4秒間に水深方向に20 cm 程度動いている。このエコーグラムでの水深方向は、送受波器との相対距離を表しており、単純に水深方向のみに移動しているわけではない。次に TS スペクトルでは、この4秒間に最大で10 dB 程度変動している。エコーレベルはほぼ同じであるにもかかわらず、そのエコーの成分である TS スペクトルは変動している。他の部分でも同じ現象が確認できた。つまりこれは魚の動きによる TS スペクトルの変動であると結び付けられる。魚が動くことで姿勢角が変化し、TS スペクトルに変動が現れている。

得られた3尾の魚の TS スペクトルで、70 kHz と100 kHz 時の500ピング分の最大 TS、平均 TS、標準化 TS を Table 4-2にまとめる。標準化 TS は、平均 TS の値と尾叉長を用いて求めた。得られた標準化 TS は、一般的な姿勢平均の標準化 TS 値 -66.0 dB よりも小さい結果となったが、これらは魚を懸垂したことで、魚が激しく暴れ、もとの TS の値が低かったためと考えられる。また、測定された TS 値の最大を

用いて標準化 TS を求めた場合は、一般的な有鰭魚の最大標準化 TS の値、 -60 dB に近くなり、妥当な値を得られた。

このような姿勢変動を伴った自然状態の TS スペクトルを連続的に得ることができれば、魚の遊泳時の情報増加に繋がる。貞安らは、シミュレーションによりスケトウダラの遊泳による魚体の屈折運動が TS に与える影響を示している（貞安ら、2005）。この研究の中で、魚の屈折運動による TS 変動よりも遊泳姿勢角による TS の変動が大きいことが示されている。

姿勢角変動を含んだ自然状態の魚の TS スペクトルの変動パターンを分類できれば、TS スペクトルと、エコーグラムから魚種識別のための基礎情報になりうる。しかしながら、今回用いた方法では、TC 球の共振周波数付近における TS 値が精確には求められない。金属球は、反射に指向性を有さないため、球と対象の方向が同じとみなせれば、指向性関数の補正に使用できる。しかし、用いる音波の周波数、球の径により、指向性関数を補正不可能な点があるのも事実である。また、常に金属球を吊るし魚からの反射波測定を行うのは、実用的でない。精確に連続の周波数での TS スペクトルを求める上では、指向性関数補正が1つの課題である。

以上本節で、TC 球の散乱特性を利用して指向性関数を補正して、活きた魚の TS スペクトルを測定した。

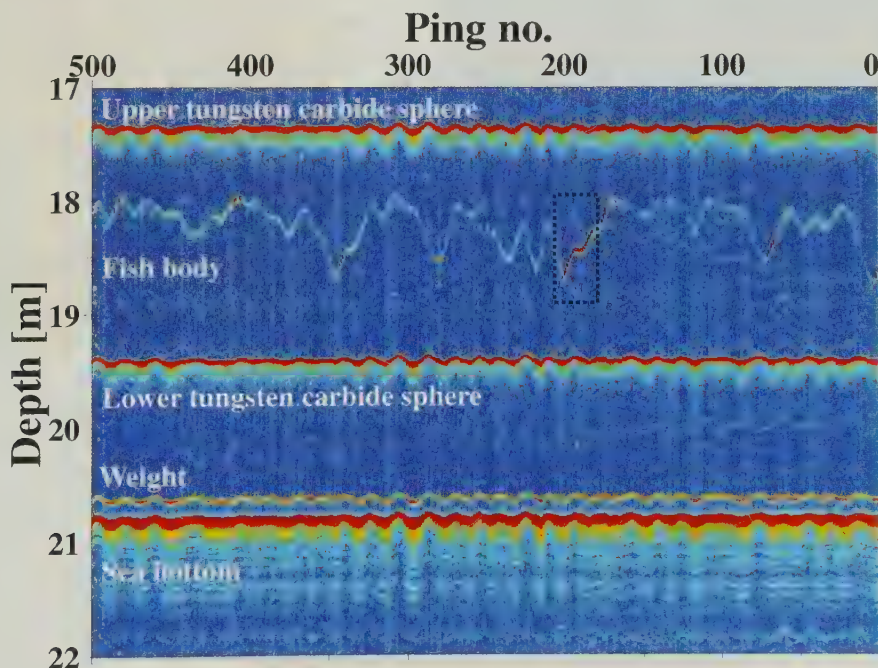


Fig. 4-15. The echogram showing two TC spheres and grunt fish.

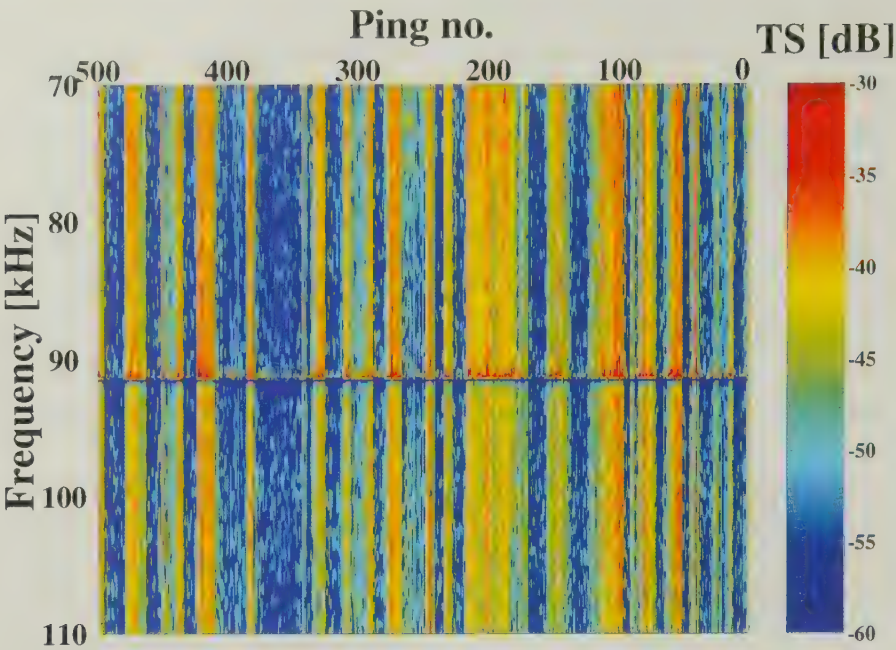


Fig. 4-16. The TS spectrum of chicken grunt are compensated by TC sphere. The x axis shows ping (100 s), the y axis shows frequency, and color shows TS value.

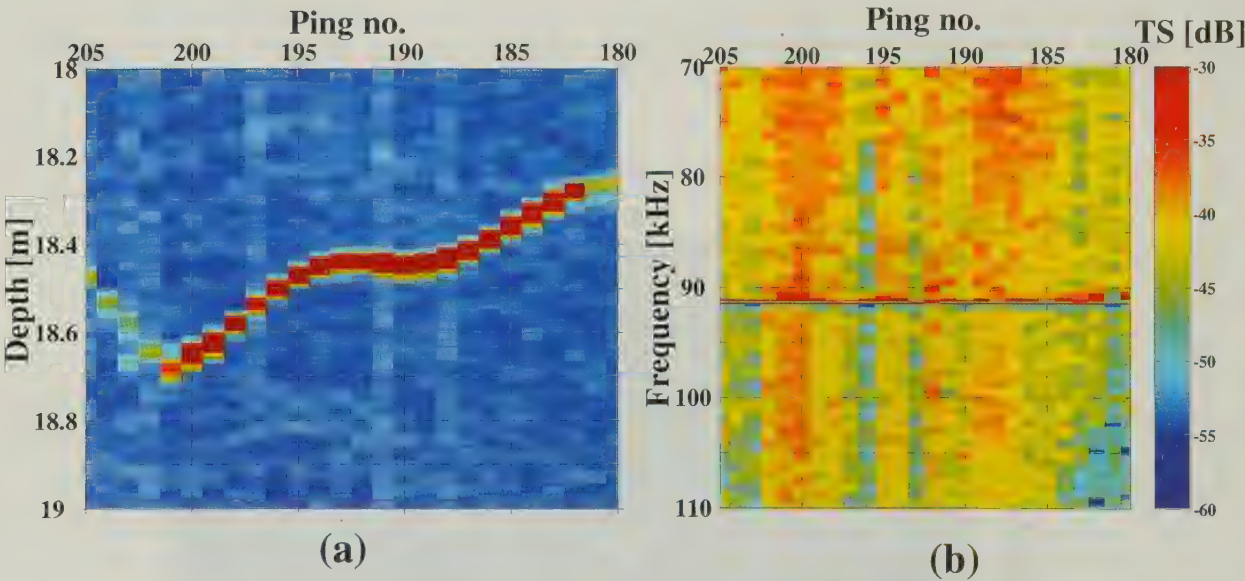


Fig. 4-17. The TS spectrum of chicken grunt compensated by the scattering amplitude of TC sphere in 180 ping to 205 ping (at dotted line Fig. 4-15). The echogram is (a), TS spectrum is (b).

しかし、TC 球での補正は限界があるために、他の方法を用いて指向性関数を補正する必要がある。

4.5 自然状態の魚のエコーストレングスの測定

イルカのソーナー音の継続時間は、一般的な魚群探知機の1/10以下である。このような音波を魚群探知器に適用できれば、距離分解能の向上に繋がり、自然状態 TS 測定の限界点緩和に繋がると考えられる。そこで、実際に適用できるかを確かめるために、自然状態の魚の群れからの反射波を測定し、イルカのソーナー音が有す高い距離分解能を確認する。本節では、イルカのソーナー音を用いて、自然状態の魚からのエコーストレングススペクトルを測定した。実験は、4.3、4.4 節と同様に、東京海洋大学の実習艇「ひよどり」を用いて、千葉県館山湾沖で、2005年8月に行った。船の舷側に送波器と受波器を設置し、船を1-2 ktで走らせ、魚群を探した。また、船に装備されている魚群探知機（FURUNO FCV-582, 200 kHz パルス幅 1 ms）と、本システムを同時動かし、自然状態の魚のエコーを取得し、比較を行った。本実験では、ハンドウイルカよりも SN 比のよいスナメリのソーナー音を使用し、0.5 s おきに音波を送波した。

Fig. 4-18に自然状態の魚のエコーグラムを示す。スナメリの音波は、継続時間が150 μ s とハンドウイルカのものよりは長いが、一般的な魚群探知機よりも短いため、高い距離分解能を得られている。この4つの魚（対象）は、魚体間距離が40 cm 程度のやや密集した群れである。得られたエコー 1 つ 1 つに対して、エコーストレングススペクトルを計測した。具体的に

は、指向性関数と、魚の散乱振幅の積をデシベルで表し、

$$RTS = 20\log(D_T(\omega, \theta)\Gamma_s(\omega, \theta_i)D_R(\omega, \theta)) \quad (4.4)$$

とした。Fig. 4-19に測定したエコーストレングススペクトルを示す。指向性関数の影響を含んでしまっているため、定量的なものではないが、この得られたエコーストレングスの中には、4.3 節で述べたように、対象の姿勢角の情報、深度の情報、遊泳速度の情報、周波数情報、大きさ（TS）の情報など、対象識別のための多くの基礎情報が入っている。つまり、エコーストレングスから、指向性関数の影響を除くことができ、精確な TS スペクトルを高い距離分解能を有したまま連続で得られれば、対象識別のための基礎情報増加に繋がる。

Fig. 4-20に本システムと同時に測定された通常の魚群探知機のエコーグラムを示す。通常の魚群探知機を用いたエコーグラムでは、海底と魚のエコーが分離できていない。それに対して、本システムを用いた場合は、海底と魚の分離が来ている。パルス幅を短くすることで、高い距離分解能が実現できている。Fig. 4-20 (b)において深度方向に伸びているエコーは、通常の魚群探知機の音波の干渉によるものである。広帯域の受波器は、このように他の音波の周波数帯の干渉、混信を起こしてしまう。対象の信号のみを取得するために、フィルタをかけるなどの対策が必要である。

以上、本節において、イルカのソーナー音を用いて、自然状態の魚の群れのエコーストレングススペクトルを高い距離分解能を有しながら測定した。また、通常

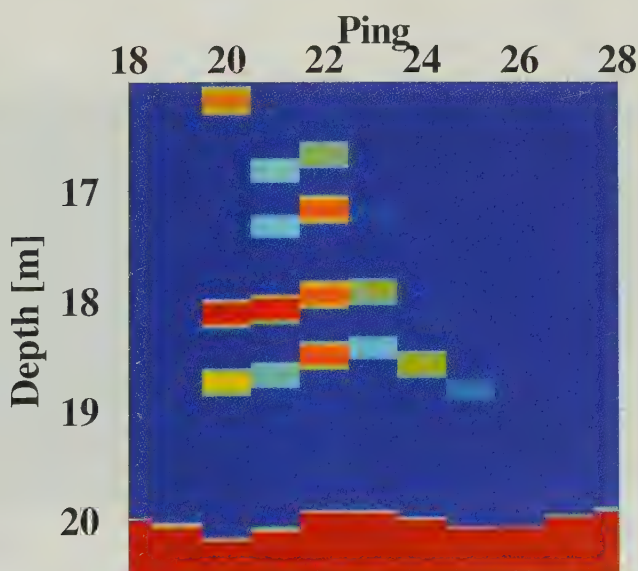


Fig. 4-18. The echogram showing *in situ* fish (in 10 s).

の魚群探知機との比較も行った。イルカのソーナー音を魚群探知機に適用すれば、高い距離分解能を得られ、自然状態 TS 測定に限界点緩和に繋がる。また、広帯域のエコーストレングススペクトル、TS スペクトルを測定し、魚の動きによる TS スペクトル変化を確認できた。

4.6 結 言

本章では、魚の TS スペクトルの取得を試みた。第 4.2 節では、淡水水槽で麻酔をかけた魚の精確な TS スペクトルを測定した。また、1 尾のマダイの姿勢角を変化させて TS スペクトルを測定した。TS スペクトルは、魚種、姿勢、個体差により大きく変化する。

次に 4.3 節で海上実験を行う際に必要な、海水の

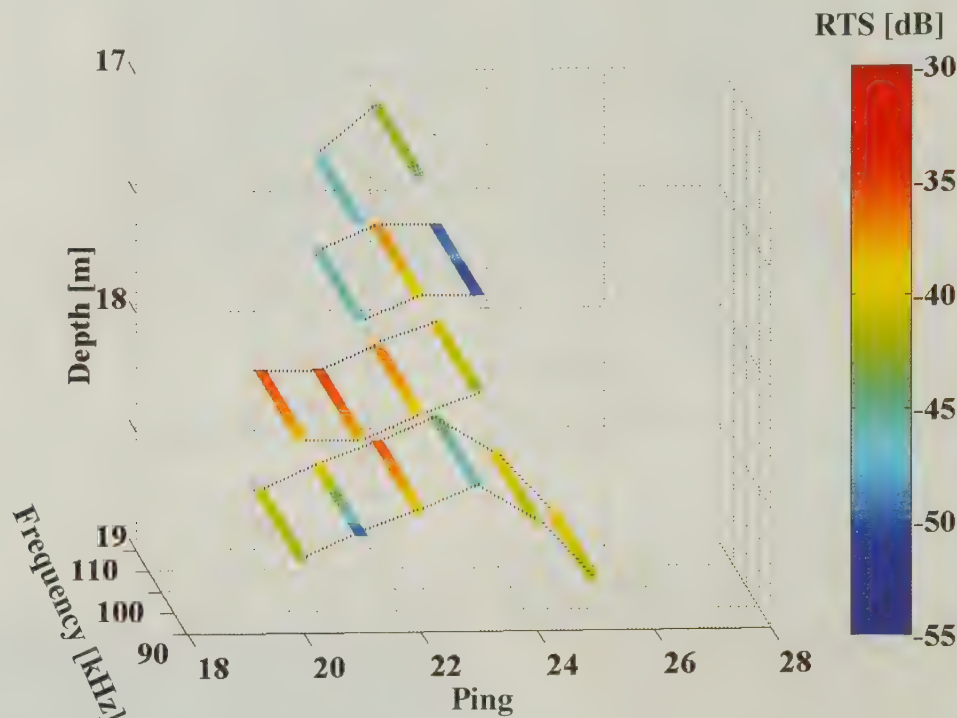


Fig. 4-19. The echo strength of *in situ* fish. The x axis shows ping number, the y axis shows depth, the z axis shows frequency and color shows echo strength value.

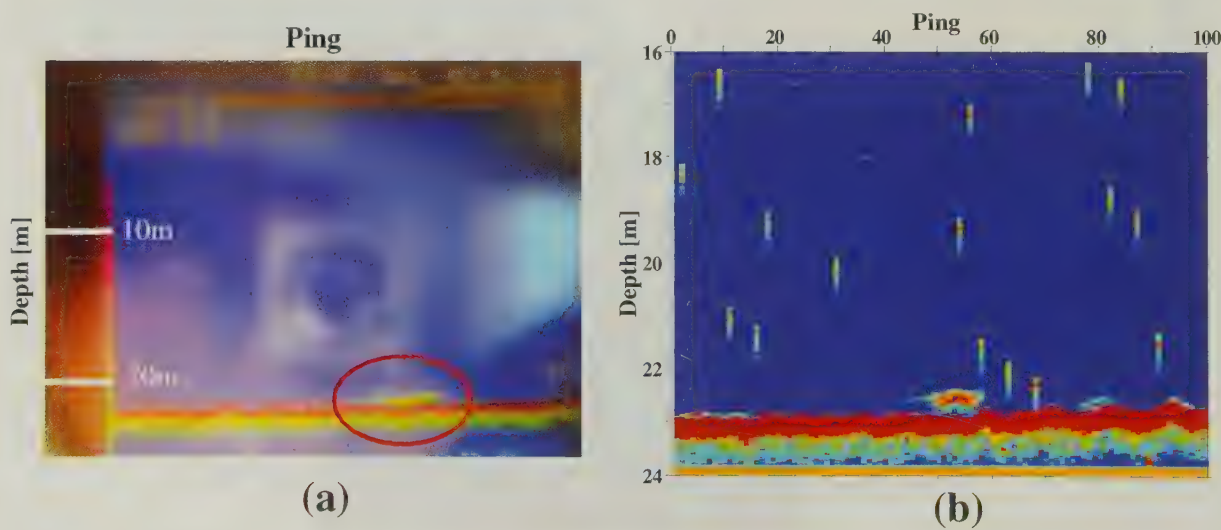


Fig. 4-20. Comparison of the echogram measured by the echo sounder (a), by using our measurement system (b).

吸収係数の補正方法を既往の研究から決定した。この値を用いて麻醉をかけて懸垂したマアジのエコーストレンジスを測定し、既往の研究と比較し、妥当な値を得ているのを確認した。この中で、指向性関数の補正が1つの大きな問題点となった。

第4.4節では、TC球を用いて指向性関数の補正を試みた。計算により理論的に求めたTC球の散乱特性を利用して指向性関数を補正し、準自然状態の魚のTSスペクトルを測定できた。しかし、TC球の散乱特性の共振点(92 kHz)付近では精確なTSスペクトルを求めることが出来なかった。この点から連続のTSスペクトルを求められてはいない。しかし反射に指向性のない金属球は、システムの較正だけでなく、指向性関数の補正にも有効であることが示された。

第4.5節では、自然状態の魚のエコーストレンジスを測定した。指向性関数を含んだ状態ではあったが、高い距離分解能でエコーストレンジスを計測でき、自然状態の魚のTSスペクトルが、対象識別のための基礎情報増加に資すると結論付けた。また、通常の魚群探知機のエコグラムと比較して、高い距離分解能を確認した。本実験では、スナメリのソーナー音を用いたが、ハンドウイルカのソーナー音を用いた場合は、理論的な距離分解能は、8 cmである。つまり、ハンドウイルカのソーナー音を用いれば、大幅な距離分解能の向上に繋がる。しかし、通常の魚群探知機の信号の混信が確認できた。一般に広帯域信号は、高い信号対雑音比(SN比)を得ることができない。そこで、フィルタなどを用いてSN比を上げ、混信を除去する必要がある。

本章では、シングルビームの受信機とTC球を用いて指向性関数の補正を行ったが、限界があることがわかった。そこで、次章においてイルカのような広帯域音波を用いたスプリットビーム法を開発し、指向性関数の補正を行い、対象のTSスペクトルを求める。

第5章 広帯域スプリットビーム(BSB)システムの開発

5.1 緒言

前章では、海で準自然状態の魚のTSスペクトルの測定に成功した。しかし、前章までのような単一ビームを用いるシステムでは、送受波器と魚がなす相対角度が不明であるため、真に自然状態の魚に対しては、指向性関数の補正が出来ず、広帯域での精確なTSスペクトルの測定は不可能である。そこで、本章では、指向性関数の補正を行い、自然状態の魚のTSスペクトルを精確に求められる、イルカのような広帯域信号を送受波可能な、広帯域スプリットビーム

(Broadband Split-Beam, 以下BSB)法を提案し、システム開発を行なう。BSB法は、世界でも初めての試みであり、その処理方法が従来のスプリットビーム(Split-Beam, 以下SB)法とは異なるため、装置と処理方法の新規開発が必要である。そこで、本章では、BSB法のシステムを構築し、処理方法を確立し、イルカのような広帯域音波を用いて、対象の位置角を測定し、指向性関数の補正を行い、精確なTSスペクトル測定を可能とする。

イルカが、このような方法を使用しているかは不明であるが、人間と同じ様に2つの内耳を持ち、左右の内耳への反射波の到達時間差やレベル差などの違いにより、対象の方向を推定していると考えられる(Au, 1993)。また、イルカは対象の方向を向くことにより、対象方向に指向性主軸を合わせることもでき、指向性主軸での観測をしているとも考えられる。これらは、我々がSB法で指向性補正を行うのに等価であり、その結果、対象に固有の反射強度の真に近い値を知ることができ、対象の大きさの判断や種別に有利に働いているであろう。そこで、BSB法の開発は、イルカのソーナーに似せた人工ソーナーの開発でもある。

以下、5.2節において、SB法の原理について述べ、BSB法を構築する際の検討項目を確認する。5.3節で開発した広帯域スプリットビームシステムについて述べる。5.4節において、広帯域で送受波器の指向性関数を補正するためのモデルの決定と、位置角推定のために必要なパラメータであるアレイ中心間距離を決定する。また、SB法の礎になる時間差(位相差)検出方法を決定し、BSB法を確立する。さらに、送受分離システムを利用する上で問題になる送波器と受波器の中心間距離による誤差角度についても検討する。最後に、BSB法を用いてTSスペクトルを求める方法について述べる。

5.2 スプリットビーム(SB)法

自然状態の魚のTSを精確に測定する上で、魚と送受波器がなす相対的な位置角を測定し、送受波器の指向性関数を補正することは、必要不可欠である。本節では、指向性関数補正のための1つの方法であるSB法に関して述べる。また、BSB法を確立する上での検討項目の確認を行う。

SB法の原理をFig. 5-1に示す。SB法は受波器を分割し、方位測定用アレイ(方位アレイ)のペアを前後と左右用に2つ作り、それぞれの方位測定用アレイに到達するエコーの時間差により、前後方向、左右方向の位相差(又は時間差)の測定を行う。ここでは、受波器中心を原点、船首(fore)－船尾(aft)方向をx軸、

左舷 (port) - 右舷 (starboard) 方向を y 軸, 受波面に垂直な向きを z 軸とし, 方位アレイのアレイ中心間距離を d とする。対象の極座標を (r, θ, ϕ) とすると, 直交座標系 (x, y, z) は $(r \sin \theta \cos \phi, r \sin \theta \sin \phi, r \cos \theta)$ となる。したがって, 対象から各位相アレイ中心までの距離 l は, f を船首方向ビーム, a を船尾方向ビームを表す添え字とすると, 次式のように近似できる。

$$l_f \cong r - \frac{d}{2} \sin \theta \cos \phi$$

$$l_a \cong r + \frac{d}{2} \sin \theta \cos \phi$$

(5.1)

また, 右舷 (添え字 s), 左舷 (添え字 p) 方向では,

$$l_s \cong r - \frac{d}{2} \sin \theta \sin \phi$$

$$l_p \cong r + \frac{d}{2} \sin \theta \sin \phi$$

(5.2)

となる。いまここで, 方位アレイで受けたエコー (方位信号) 間の位相差を δ_x, δ_y とすると, k を波数として,

$$\delta_x = k(l_a - l_f) = kd \sin \theta \cos \phi$$

$$\delta_y = k(l_p - l_s) = kd \sin \theta \sin \phi$$

(5.3)

と表せる。(5.3) 式より, 対象の位置角 (θ, ϕ) は, 次式のように表される。

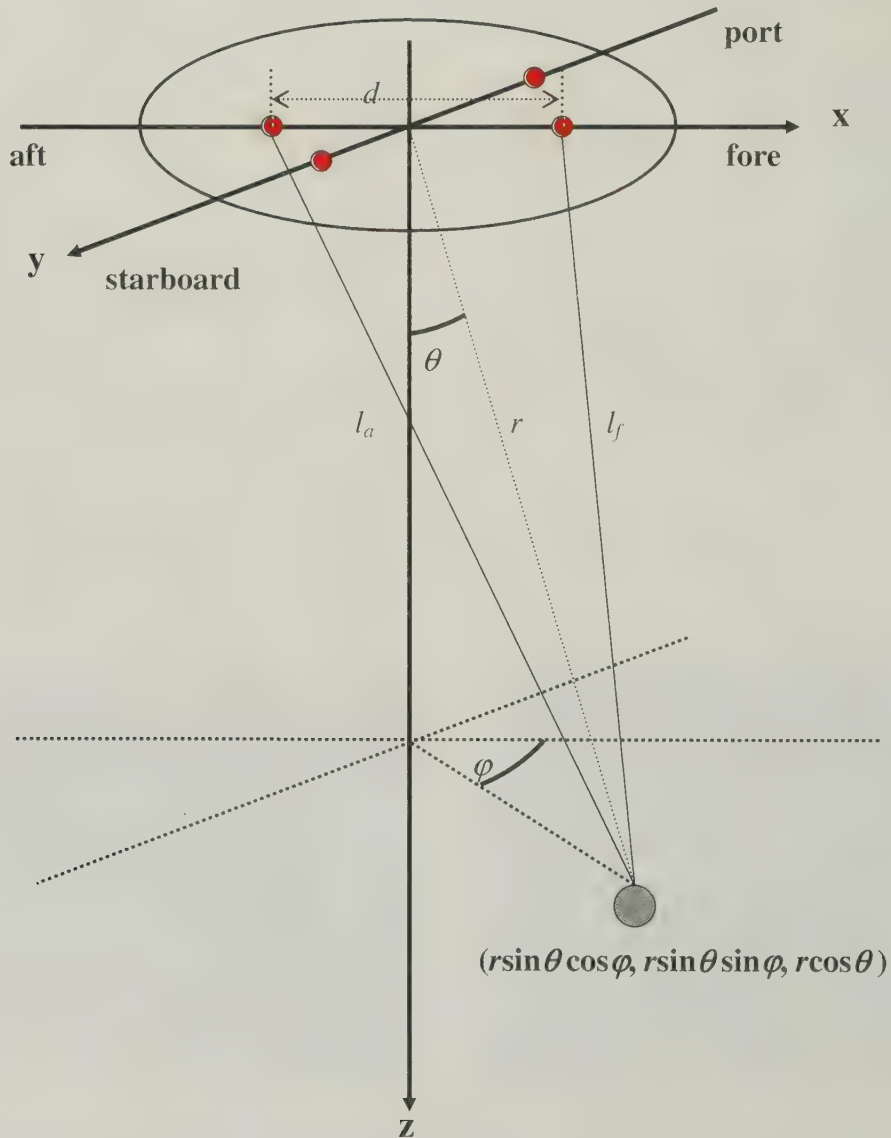


Fig. 5-1. Principle of the split-beam method.

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2}}{kd} \right)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\delta_y}{\delta_x} \right) \quad (5.4)$$

また、パルスエコー法（反射波の到達時間測定）により、対象までの直線距離 r が得られ、これと SB 法により測定した位置角 θ 、 ϕ とを組み合わせ、位置推定が可能である。

一般的な計量魚群探知機である狭帯域音波を用いた TS 測定の場合には、SB 法において、4 分サンプル相互相関法（甘糟, 2001; Hsieh, 1986）などにより位相差 δ_x 、 δ_y を検出し、対象の位置角 θ 、 ϕ を求めている。しかし、本研究では、イルカのような時間に対して周波数成分が変化する広帯域音波（Fig. 2-5）を用いて、対象の位置角を推定する。つまり、位相差または時間差を検出する方法が従来の方法とは異なるので、検討する必要がある。本研究では時間差を用いた位置角測定法を採用する。すなわち、上記の方法と同様に得られた反射波の船首－船尾方向における到達時間差 Δ_x と、右舷－左舷方向の到達時間差 Δ_y を利用して対象の位置角を求める。(5.3)、(5.4) 式を変形すると

$$\Delta_x = \frac{l_a - l_f}{c} = \frac{d}{c} \sin \theta \cos \phi$$

$$\Delta_y = \frac{l_p - l_s}{c} = \frac{d}{c} \sin \theta \sin \phi \quad (5.5)$$

となり、位置角 θ 、 ϕ は、

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{c \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}}{d} \right)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta_y}{\Delta_x} \right) \quad (5.6)$$

で求められる。

(5.4)、(5.6) 式において、位置角を決定するための重要なパラメータは、

- (1) 位相差 δ_x 、 δ_y 、または時間差 Δ_x 、 Δ_y
- (2) アレイ中心間距離 d
- (3) 水中音速 c

である。この中で水中音速 c は、使用する音波の周波数には関係がなく、水温、塩分、水深を用いた Mackenzie の式で、実用的には十分な精度で求められる (Foote, 1983)。つまり、(1)、(2) の 2 つのパラメータが SB 法の位置角推定において重要である。

時間差検出のためには、フーリエ変換による位相差検出、ヒルベルト変換による位相差検出、相互相関による時間差検出など、いくつかの方法が考えられる。

本研究ではこのうち、雑音に強くまた 1 回の処理で比較的容易に時間差が求められる相互相関を用いることとした。

以上、指向性関数補正のための SB 法の原理を述べ、BSB 法の構築に向けて、対象の位置角推定に際しての重要なパラメータを確認した。

5.3 広帯域スプリットビーム (BSB) システム

本節では、実際に用いる広帯域送受信システムについて述べる。Fig. 5-2 に構築したシステムを示す。本システムも、前章までのシステム（以下前システム）と同じように特性の揃った送受分離のシステムを用いた。前システム (Fig. 3-5) におけるパワアンプと、信号発生器以外を新たに製作し、受波器、プリアンプの SB 化と、その受波器とはほぼ同じ特性を持つ送波器を開発した（古野電気㈱に特注）。また、SB 化に対応して、同時に多くのデータを計測できるように、オシロスコープを変更した。まず、送波部では、任意波形発生装置により発生した信号をパワアンプにより増幅し、送波器へと出力する。次に、受波部では、反射波を円配列を 4 分割した受波器で受波し、それぞれの 4 分円信号はプリアンプを介し、オシロスコープ (Lecroy, Wave Runner 6000A) で直接観察および測定される。このとき、プリアンプには、4 分円信号を全て合成したレベル信号と、4 分円信号それぞれで、合計 5 つの出力がある。得られた各信号を PC へ転送し、オフラインで解析を行う。

用いた受波器の写真と、海上実験、水槽実験で反射波を測定する送受波器の支持具を Fig. 5-3 に示す。受波器は、頂点に船首印があり、受波円アレイが 4 分割されている (Fig. 5-3 (a))。また、SB 法に必要な方位信号は、2 つの 4 分円信号を足し合わせ、半円状に 2 分割されアレイ（半円アレイ）により求める。例えば、船首方位信号は 4 分円アレイ CH1 と CH2 を足し合わせて合成する。本システムではスペクトル比法を実現するために、前章までと同様に同じ特性の送波器と受波器を用いており、送波器ではすべての四分円アレイを用いて音波の送波を行う。

5.4 指向性関数およびアレイ中心間距離

本節では、5.2 節において確認した検討するべきパラメータを検討・決定し、BSB 法を構築する。BSB 法において最終目的は、受波器を 2 分割した 2 組の方位アレイを用いた SB 法により対象の位置角を測定し、レベルアレイの指向性関数を補正して、対象の TS スペクトルを正確に求めることである。しかし、広帯域の音波を用いる場合、周波数により指向性関数

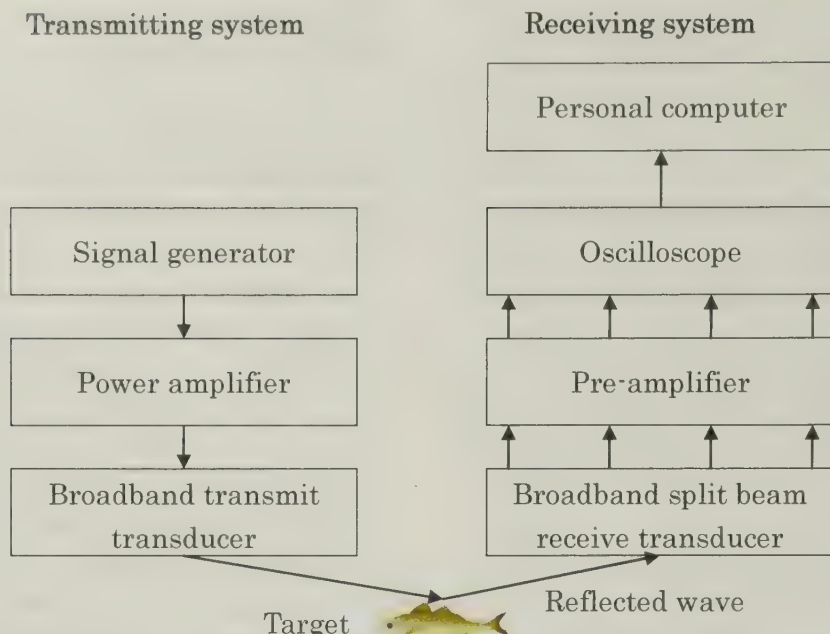


Fig. 5-2. Schematic diagram of broadband split beam (BSB) experimental set up. Reflected wave is received each split arrays of BSB receive transducer.

が異なる (Fig. 3-7参照)。使用するすべての帯域の周波数について指向性関数を測定し、補正することは、現実的ではない。そこで、理論的な指向性関数と実測値とを比較・検討し、レベルアレイの広帯域での指向性モデル (等価円板振動子の指向性) を決定する。

また、(5.4)、(5.6) 式において、対象の位置角を求めるために、受波器を2分割した方位アレイのアレイ中心間距離 d を使用する。この値は、送受波器の設計時にはほぼ決定されるが、素子の配列方法やモールドの過程で、多少の誤差が生じる。そこで、アレイ中心間距離を理論により検討し、素子の配置の重心から計算した結果と比較し、実際に使用するアレイ中心間距離を決定する。

5.4.1 指向性関数の決定方法

いま、Fig. 5-1の座標系に反射対象があり、対象からの反射波が送受波器のアレイを構成する各素子に入射するとする。この各素子への入射波を合成する。この時、素子の座標を (x, y) とすると対象と各素子間の距離 R は、

$$R = \sqrt{(r \sin \theta \cos \phi - x)^2 + (r \sin \theta \sin \phi - y)^2 + (r \cos \theta)^2} \\ \cong r - \sin \theta (x \cos \phi + y \sin \phi) \quad (5.7)$$

と近似できる。(5.7) 式において $-\sin \theta (x \cos \phi + y \sin \phi)$ が

アレイ中心を基準とした距離差であり、これを Δr とおくと、アレイ全体の指向性 D_a は、

$$D_a = \left| \frac{\sum \exp(jk\Delta r_i)}{M} \right| \quad (5.8)$$

と表せる。ここで i はアレイを構成する素子番号、 k は波数、 M は分子の絶対値の最大値を表す。(5.8) 式は、各アレイ位置に無指向性の点音源をおいた場合の指向性であり、実際の指向性は、素子の指向性を D_e とすると、積定理 (Clay and Medwin, 1977) より、

$$D = D_a D_e \quad (5.9)$$

と表される。ここで素子の指向性 D_e は、通常の円形ピストンの指向性に、ソフトバッファ条件を加味した次式を用いる (海洋音響学会, 2004)。

$$D_e = \left| \frac{2J_1(ka_e \sin \theta)}{ka_e \sin \theta} \cos \theta \right| \quad (5.10)$$

ここに、 J_1 は1種1次のベッセル関数、 a_e は素子半径、 θ は指向性主軸 (ビーム軸) からの角度である。(5.8)、(5.10) 式に素子配列座標と素子半径を与えれば、指向性関数を理論的に計算可能である。

Fig. 5-4に、周波数100 kHz の場合の、アレイ配列から計算した結果と測定結果、および、それらに合うように (5.10) 式を用いて等価的な半径を5.3 cm と

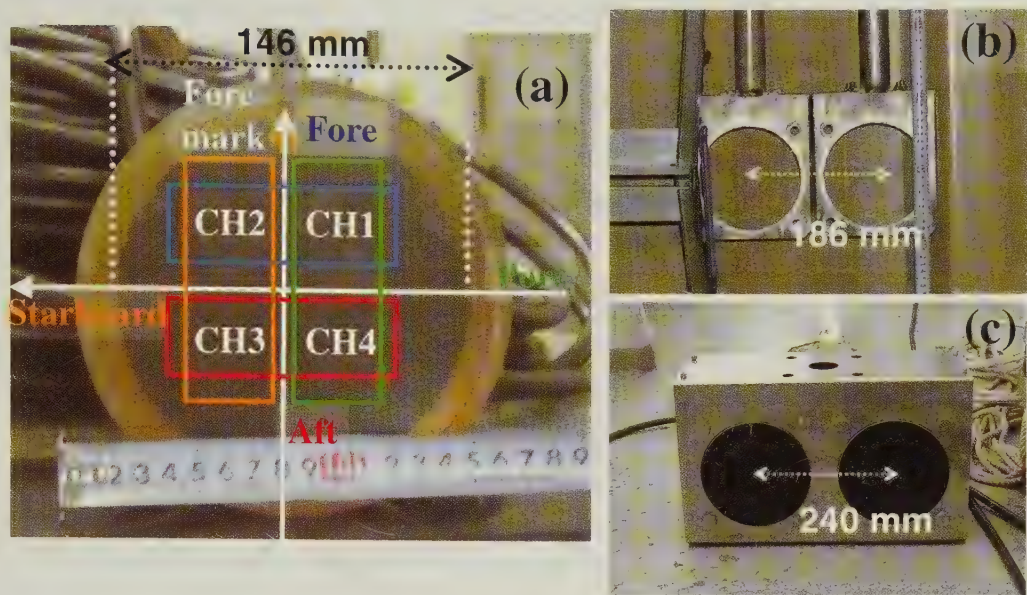


Fig. 5-3. Photograph of the split beam receive transducer (a), transducer installation in tank experiment (b), and at sea experiment (c). The receive transducer is separated in four quadrant array channels. Direction signals are composed by adding two quadrant signals, for example fore direction signal is made by CH1 and CH2 signals.

決めて円形ピストンモデルによって計算した指向性関数を示す。ビーム幅（- 3 dB）は、すべての結果において8.3°である。実測値と理論値、理論値と等価的モデルによるそれぞれの結果が一致した。したがって、この等価的な指向性関数を元に、他の周波数の指向性関数も求められる。等価的指向性関数を用いて求めた、本システムで用いる主要な周波数数における - 3 dB ビーム幅は、

60kHz	13.8°
80kHz	10.4°
100kHz	8.3°
120kHz	6.9°

である。

次に、他の周波数の指向性関数も実際に確認するために、4つの周波数について送波器の指向性関数の測定を行い前述のモデルと比較した。実験は、水産総合研究センター水産工学研究所（茨城県神栖市）の測器電子機器実験棟内の球面波水槽（長さ15 m × 幅10 m × 深さ10 m）で行った。Fig. 5-5に実験方法を示す。球面波水槽には、送受波器の位置を、上下左右、回転など精密に電子制御可能な移動台車があり、精確な測定が可能である。送波器の正面に広帯域のハイドロフ

オンを設置し、送波器からの直接波を測定した。実験の始めに送波器を上下左右に動かし、送波ビームの主軸を探した。送波器を水平面内で1°おきに回転させ、送波器とハイドロフォンの相対角度を変化させ測定を行った。用いたソーナー音は、パルス幅がそれぞれ異なるが、一定の振幅を得られる170サイクルの長パースト波で、中心周波数が60, 80, 100, 110 kHz の4種類を用いた。

測定した指向性関数とモデルとの比較結果を Fig. 5-6に示す。四角が実測値を、直線が半径5.3 cm の円形ピストンモデルによる指向特性である。4つの周波数すべてで、モデルと実測値の指向性関数がほぼ一致した。つまり、本研究で使用する帯域内において、上記モデルによる指向性関数を使用でき、レベル信号に対する指向性関数の補正が広帯域で可能である。

5.4.2 アレイ中心間距離の決定

方位アレイは半円形をしているので、アレイ中心間距離 d を簡単には決められない。そこで、アレイ中心間距離を、各方向からアレイへ入射する位相込みの音圧を、素子配列に与えるシミュレーションによって決定する。いま、(5.8) 式の指向性と同様の考えから、

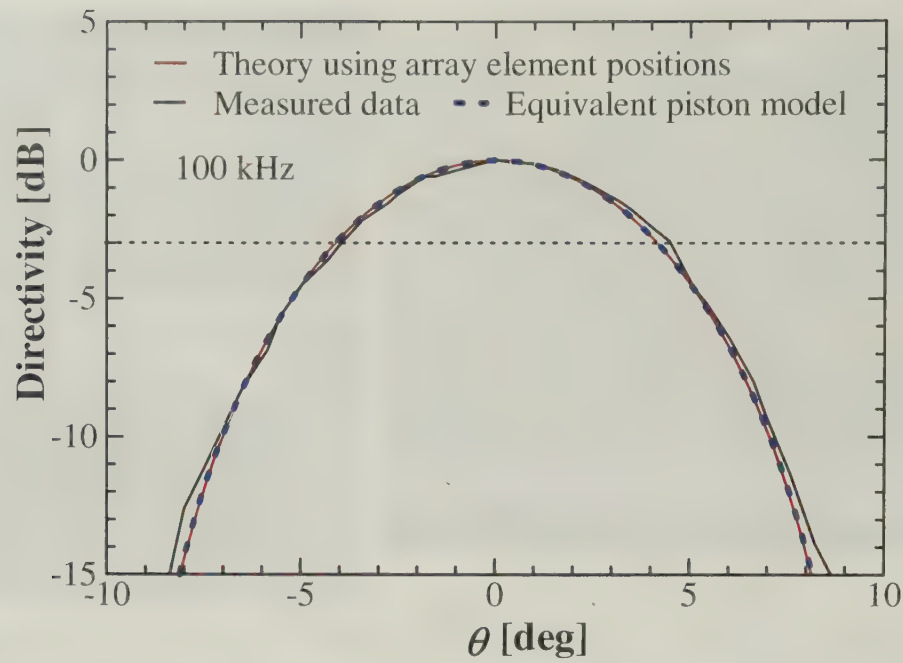


Fig. 5-4. Comparison of the directivities by theory using array element positions, by measurement, and by circular piston model with equivalent radius of 5.3 cm. The dotted line shows -3 dB level.

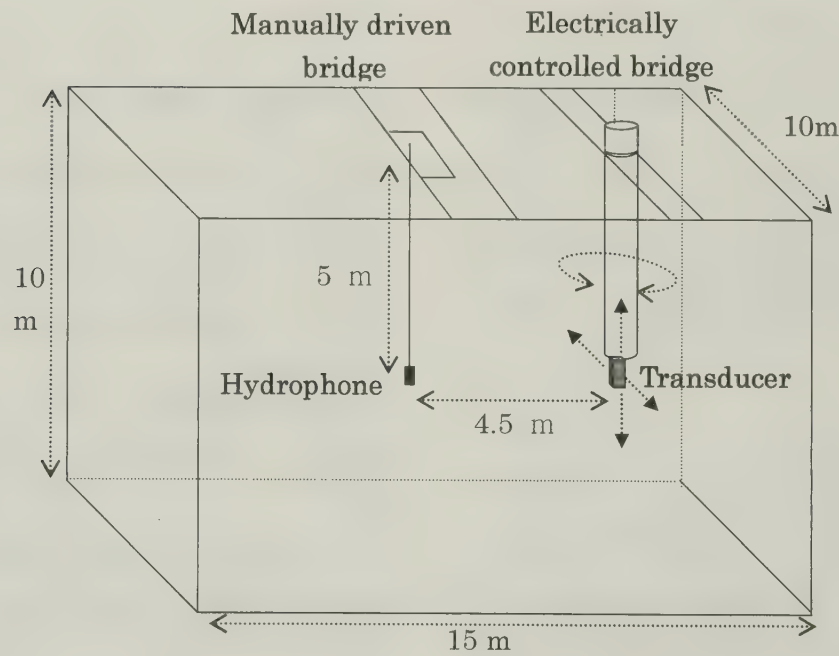


Fig. 5-5. Schematic diagram of measurement of the transmit transducer directivity. Electrically controlled transducer base can be moved up, down, right, and left, and rotated accurately.

各半円アレイの位相込みの音圧を,

$$p_h = \sum_i \exp(jk\Delta r_i) \tag{5.11}$$

と考え、前後左右方向の各アレイ信号を得る (Fig. 5-3 (a) 参照)。これらの信号の位相の船尾－船首、左舷－右舷方向の位相差を (5.4) 式を用いて、対象の位置角に変換することが可能である。実際には (5.4) 式において θ と ϕ を予め与えるので、この式を d を求める形に変形して、アレイ中心間距離 d を決めることが出来る。

いま、 θ を 0.5° から 6° まで 0.5° 刻みで、 ϕ を 0° から 90° まで 7.5° 刻みで変化させた場合、 d の平均は 45.25 mm であり、方向による変動もわずかであり、標準偏差は 0.12 mm であった。また、 ϕ は、与えた値と完全に一致した。単純に実際のアレイ配列の座標の平均 (重心) から計算したアレイ中心間距離は、 45.1 mm であり、シミュレーションによる結果とほぼ一致している。そこで以降、アレイ中心間距離は 45.2 mm として、時間差を位置角に変換する。

5.4.3 送受分離システムの指向性主軸偏移

本研究では、同じ特性の送波器と受波器を使用するので、送波器の指向性関数と受波器の指向性関数が等

しいとおける。しかし、スペクトル比法を用いるために、また送受波器周辺の回路を複雑にしないために、送受波器を分離する。そこで、送受波器を極力近づけ、かつ指向性主軸が平行になるように設置する必要がある。しかし、近距離においては主軸がずれるので、精確な指向性関数の補正の為に必要な対象までの距離と、送波器と受波器の中心間距離の関係を調べておく必要がある。

水槽実験で用いる送受分離の送受波器支持具の中心間距離は、 18.6 cm (Fig. 5-3 (b))、海上実験で用いる送受一体型の支持具では 24.0 cm (Fig. 5-3 (c)) である。いま、送波器と受波器の中心間距離を r_d 、対象までの距離を r とすると、角度偏移は、

$$\theta_e = \tan^{-1}\left(\frac{r_d}{r}\right) \tag{5.12}$$

となる。それぞれの支持具を用いた送波器と受波器の中心間距離を用いて求めた角度偏移を Fig. 5-7 に示す。比較の為に送受分離の直径から決定できる最小の中心間距離 (16.6 cm) による計算結果も示す。 r_d が 24.0 cm の場合、対象までの距離が 10 m であれば、約 1.4° の角度偏移がある。この角度偏移と、5.4.1 節において理論計算された -3 dB ビーム幅と比較する。使用する帯域内の最大の周波数である 120 kHz の

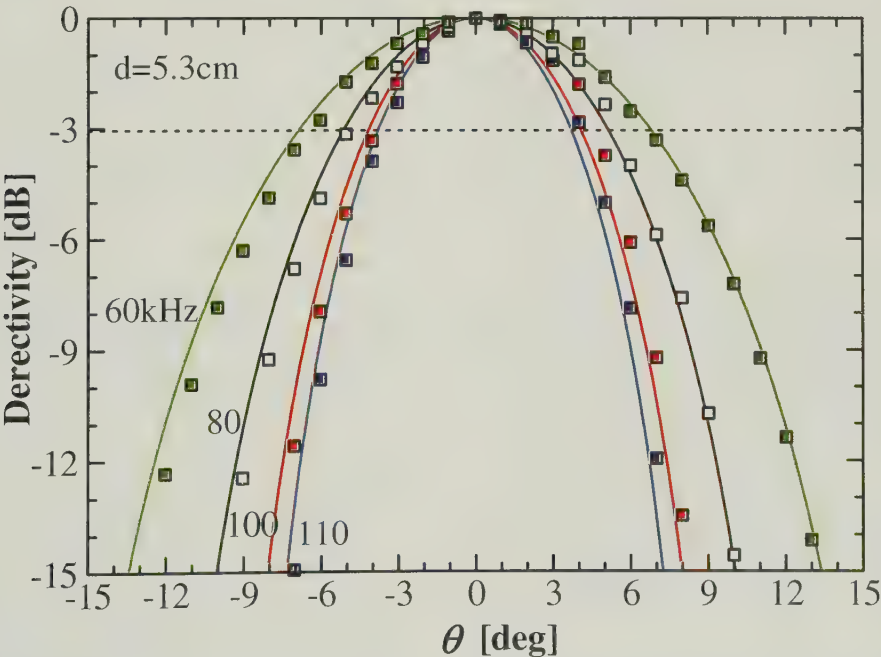


Fig. 5-6. Comparison of the measured directivities (squares) with theory (lines) at four frequencies.

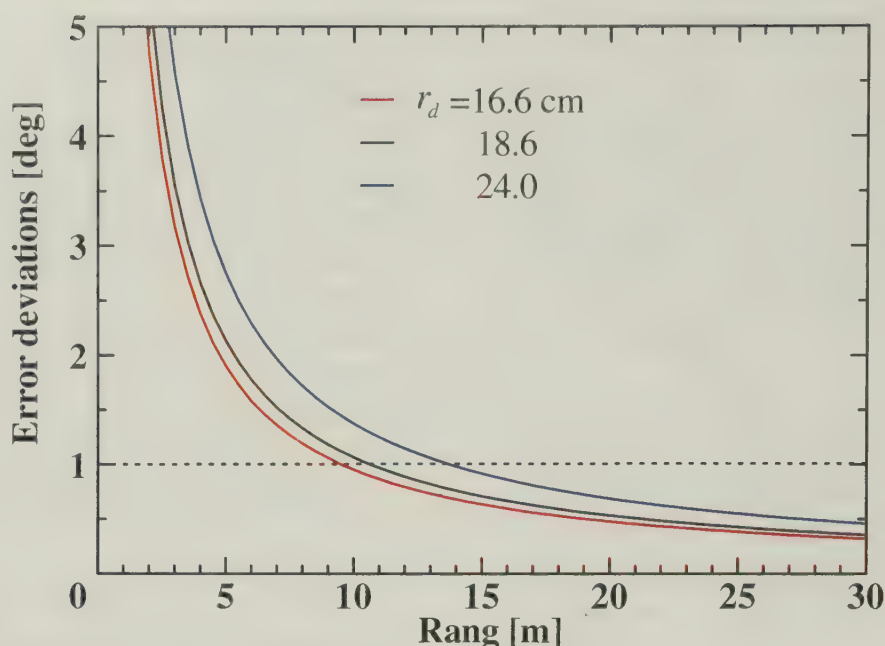


Fig. 5-7. Angle deviations by the separation distance r_d between transmit and receive transducers. The black line is for the case of tank experiment, the blue line for sea experiment, and the red line for the smallest separation determined by the transducer diameters. The dotted line shows 1 degree.

理論計算されたビーム幅は 6.9° であるので、偏移による影響が大きい。つまり、対象までの距離が10 m 未満の状態では測定された対象からの反射波に対して、指向性関数を補正する場合は、送波器と受波器の指向性関数を別に扱う必要がある。また、対象までの測角誤差を 0.5° 未満にするためには、 r_d が24.0 cm の場合、対象までの距離が28 m 以上必要である。

5.5 広帯域スプリットビーム法による TS スペクトル計測のための処理

Fig. 5-8に、前章までの成果と本章での検討結果を総合して構築した、BSB 法を用いて自然状態の魚の TS スペクトルを求めるための、フローチャートを示す。測定は、大きく入射波（レベル信号）測定と、反射波（レベル信号と方位信号）測定の3つに分かれる。

まず、入射波測定では、送受分離のシステムを用いて、送受波器を対向させて設置し、入射波を測定する。レベル信号の振幅スペクトルを入射波の振幅スペクトルとして求める。

次に、反射波測定では、対象からの反射波の各方位アレイへの到達時間差を、相互相関処理を用いて検出する。この時間差、アレイ中心間距離、音速を用いて

(5.4) 式により対象の位置角を推定する。この位置角と等価指向性関数モデルより、広帯域での指向性補正関数が求まる。

最後に、4分円アレイ信号をすべて足し合わせた反射波のレベル信号の振幅スペクトルを、この指向性補正関数を用いて補正し、入射波のスペクトルとの比を取り、対象の TS スペクトルを得る。

5.6 結 言

本章では、広帯域スプリットビーム (BSB) 法を実現できるシステムを構築し、その特性と実際に用いる場合の処理方法や留意点を述べた。

5.2 節では、まずスプリットビーム (SB) 法一般の原理について述べ、これを BSB 法の原理に発展させた。

5.3 節では、本研究で実際に用いる広帯域スプリットビームシステムについて述べた。また、前章までのシステムとの違いを述べた。広帯域音波の時間差検出方法として、相互相関処理を用いることとした。

5.4 節では、広帯域の指向性関数を補正するために送受波器の指向性関数を、アレイ素子信号を合成する理論と、等価理論モデル（円形ピストンモデル）に

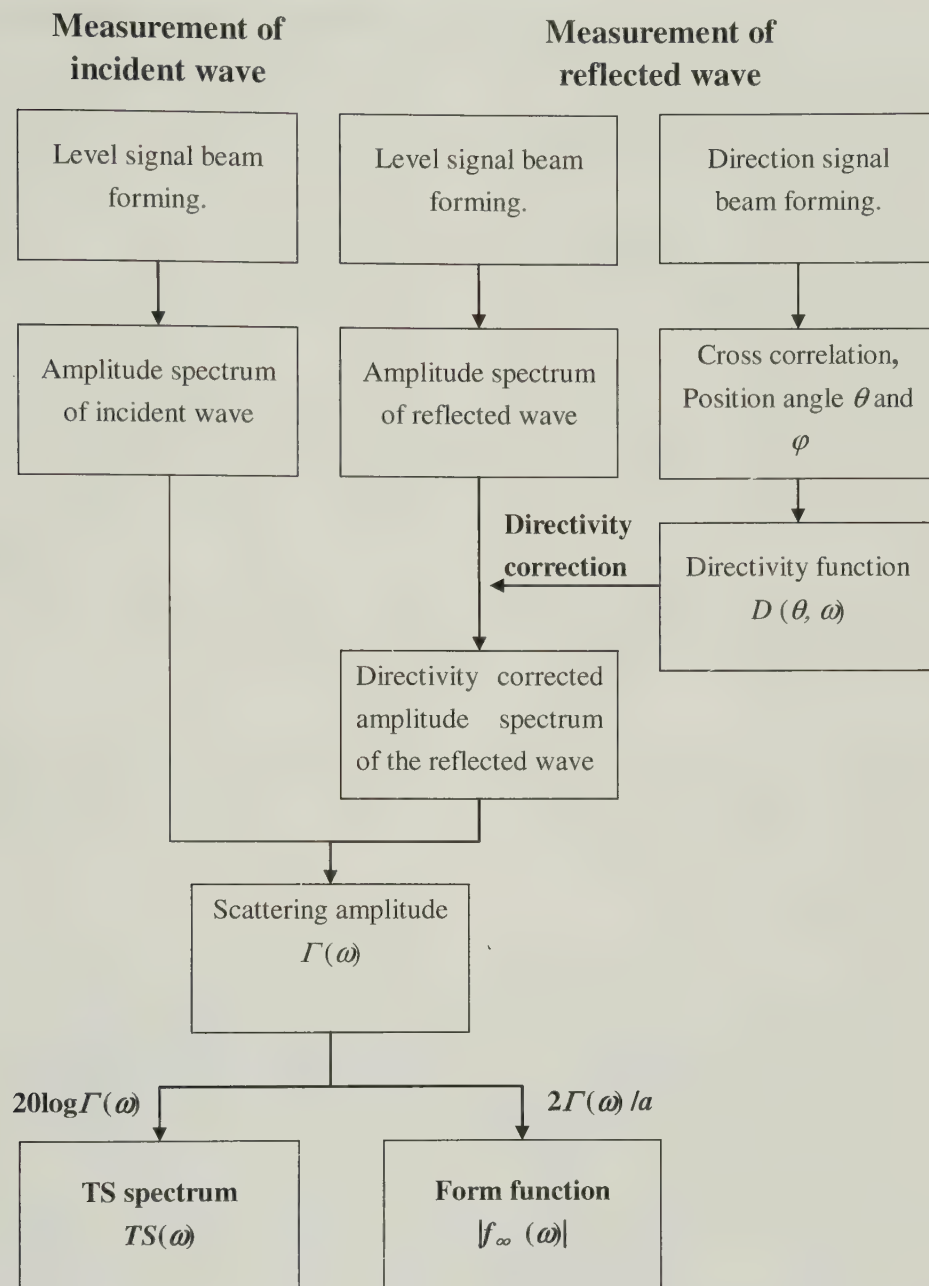


Fig. 5-8. Flowchart to measure form function or TS spectrum by broadband split-beam method compensating for the directivity function of transducers.

より求め、実測値と比較し、これらの間での良い一致を確認した。これにより、広帯域の指向性関数の補正は、半径が5.3 cmの円形ピストンの指向性モデルで行なうこととした。次に、アレイ中心間距離を理論計算から求め、アレイ位置の重心から求めたアレイ中心間距離とほぼ等しいことを確認し、45.2 mmとした。送受分離システムを用いる上での指向性主軸の偏移について検討し、対象までの距離が10 m未満と小さい場合は、注意が要ることを示した。

5.5節では、前章までの成果と本章での検討結果から、BSB法とスペクトル比法を用いて、TSスペクトルを求めるための方法を述べた。

次章においては、各種の対象について実際にTSスペクトルを測定する。

第6章 イルカのソーナー音を用いた広帯域スプリットビーム法によるTSスペクトルの測定

6.1 緒言

前章で、広帯域スプリットビーム(BSB)法のシステムを開発し、アレイ中心間距離、時間差検出方法、指向性関数の補正に用いるモデル、送受分離システムの角度偏差など、BSB法の基礎を構築した。そこで、本章では、BSB法を実際の魚などに適用し、ターゲットストレンジス(TS)スペクトル計測などに実用可能であるかを確認する。

まず、6.2節において、反射体の位置を正確に移動可能な水槽で、BSB法の基本性能を確かめる。すなわち、タングステンカーバイド(TC)球の位置測定を行う。TC球の位置角を、BSB法を用いて検出し、実際に動かしたTC球の位置と比較する。

次に、6.3節では、BSB法の最大目的である、ビーム内であればどこでもTSスペクトルを計測できることを、TC球を用いて、海上実験で確認する。反射波より位置角を測定し、送波、受波の指向性関数を補正した上で、3章で用いたスペクトル比法と組み合わせ、形状関数を測定する。これらにより、BSB法と開発システムを用いて、対象の広帯域での反射特性を正確に測定可能であることを確認する。

これらを確認した上で、6.4節において、準自然状態の魚のTSスペクトルと、自然状態の魚のTSスペクトルを連続で測定する。

6.2 水槽における金属球の位置の測定

本節ではまず、BSB法により正確に位置角を求める方法を開発する。TC球の位置を3.6節で用いた水槽(Fig. 3-9)で測定する。

反射波測定のための送受波器支持具は送波器と受波器の中心間距離が18.6 cmのもの(Fig. 5-3(b)参照)を用い、送波器、受波器と球との器間距離を3.8 mになるようにして、反射波測定を行った。送波器の120 kHzにおけるビーム幅は、約6.9°であるので、-3 dBのビームの開きは、対象までの距離が4 mの時、直径が約50 cmである。つまり、本実験では近距離であるために、角度偏移は、2°以上と大きい(Fig. 5-7)ので、送波、受波の指向性関数が異なり、対象の形状関数を正確に測定するのはむずかしい。そこで、本節では、BSB法の要の1つである位置角測定のみ焦點を当てる。

送波器と受波器を平行に設置しTC球からの反射波を測定した。壁、水面、底からの反射とTC球からのエコーを分離するために、3.6節の金属球の形状関数を測定した時と同様に、水深1.4 mに送波器、受波器とTC球を設置した(Fig. 3-9参照)。Fig. 6-1にTC球の移動位置と座標系を示す。TC球を10 cmおきに上下(x軸方向)、左右方向(y軸方向)に動かし、49箇所のそれぞれの位置で反射波を測定した。測定の始めに、TC球を上下左右方向に移動させて、各4分円アレイで測定される反射波信号の位相が一致する点、つまり、受波ビームの正面を探し、その位置を中心とした用いたソーナー音は、パルス幅が30 μ sで中心周波数が100 kHzの短バースト波、ハンドウ型、スナメリ型の3種類のソーナー音であり、サンプリング周波数5 MHzで反射波の収録を行った。

Fig. 6-2に代表として、最も広帯域のハンドウイルカのソーナー音を用いて測定した、TC球が中心位置の場合の各方位信号と、それぞれの方向の相互相関処理の球の場所がFig. 6-1中e4における結果を示す。相互相関処理により検出されたx方向の時間差は、1.6 μ s、y方向で-1.6 μ sであった。この値を(5.6)式に代入すると、 θ が4.2°、 ϕ は45°である。

同様の方法で、検出したTC球の位置と、120 kHzにおける送波と受波のビームの開き(-3 dBビーム幅による)をFig. 6-3に示す。位置角を測定するのは受波器であり、この場合の送波器は単に音を照射する役目をするので、測定位置は受波ビームの開きに対して正確であればよい。受波ビームの開きの中では、x、y方向で10 cmおきの位置の検出ができています。ビームの開きの中でも、実際の位置とBSB法により検出した位置とで、若干の差はあるが、この差は最大で2.4 cmと、測定したTC球の直径よりも小さく、誤差としては小さい。また、受波ビームの開きの外側でも、x、y方向でほぼ10 cmおきに位置の検出ができています。ビームから外れるにつれ誤差が大きくなるが、

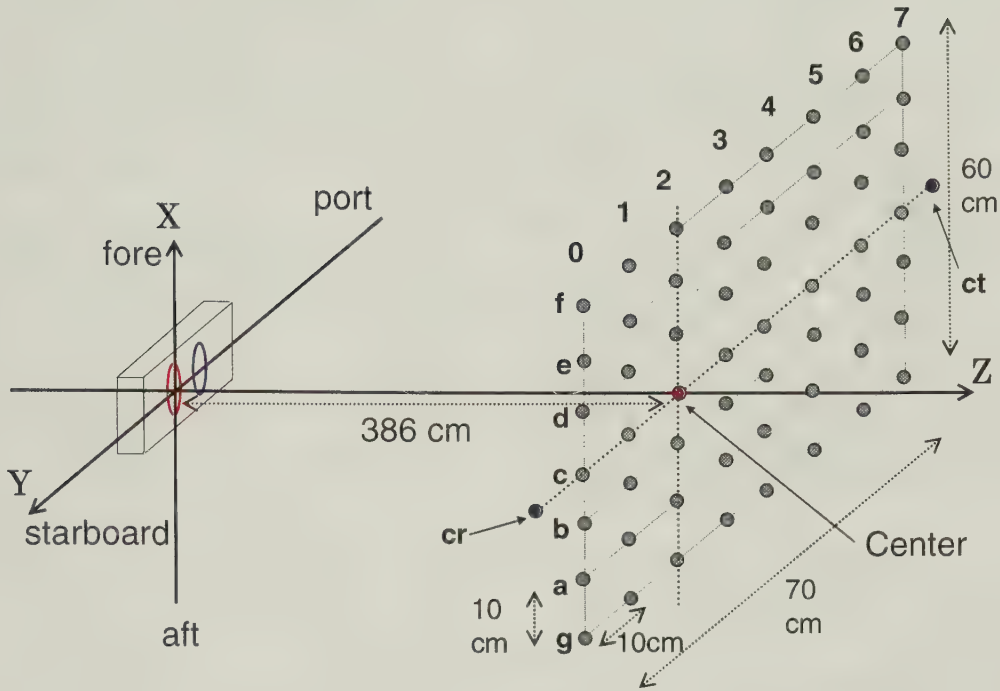


Fig. 6-1. Relationship between the transducers and TC sphere positions. TC sphere was moved by 10 cm step.

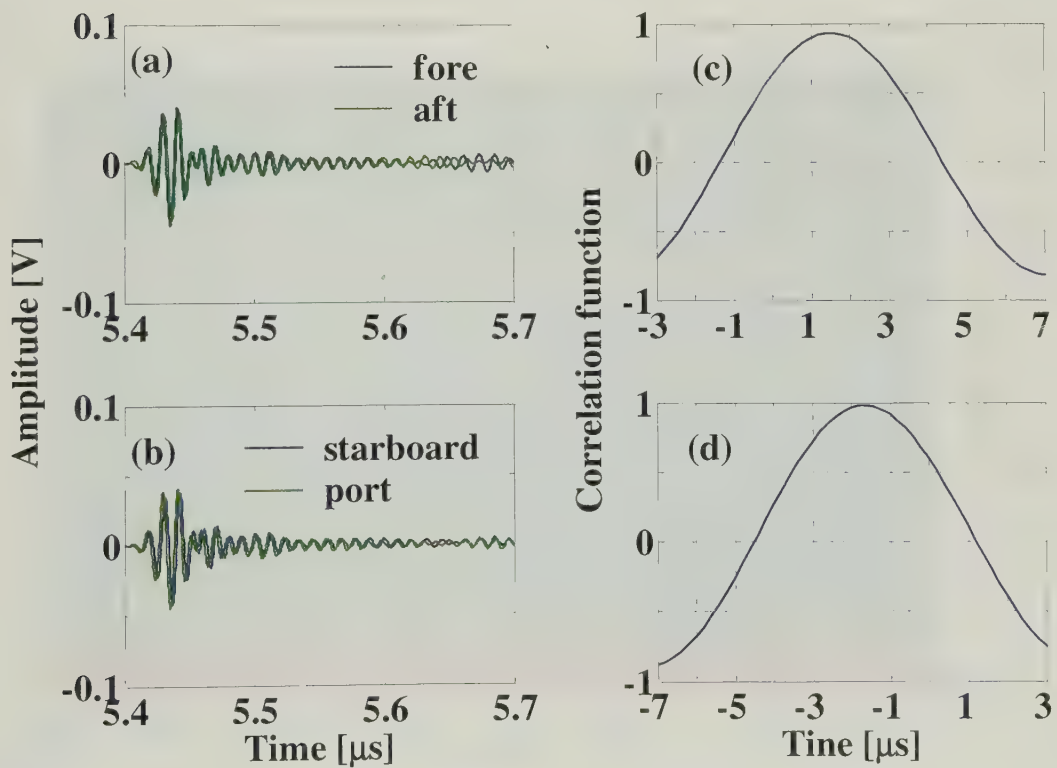


Fig. 6-2. Direction signals (left) and their cross correlation functions (right). The x axis (fore - aft) direction signals (a), the y axis (starboard - port) signals (b), the result of cross correlation processing for x axis direction signals (c), and for y axis direction signals (d).

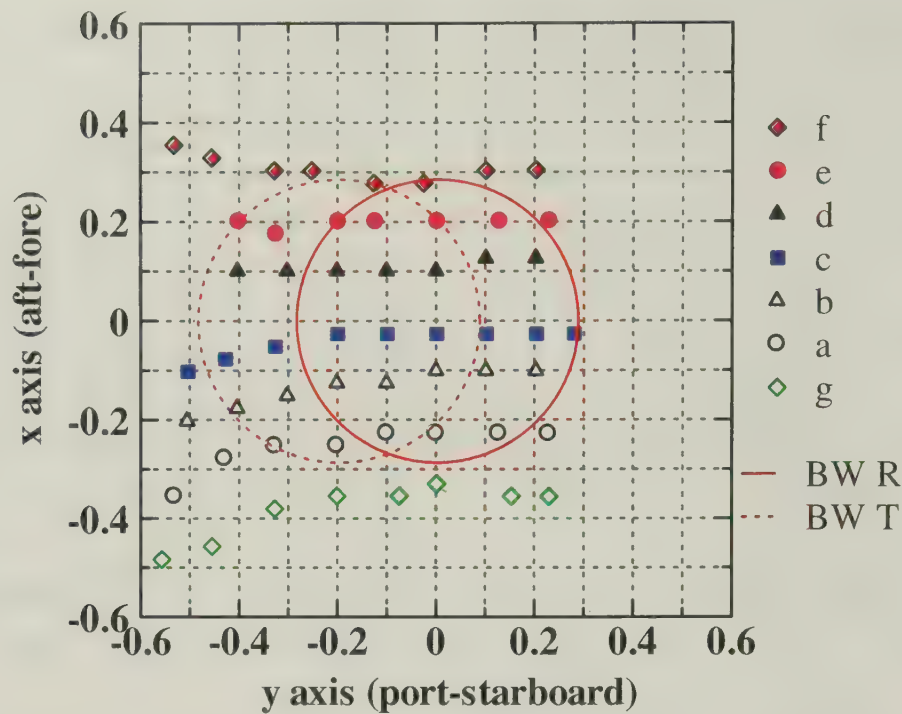


Fig. 6-3. Measured TC sphere positions by BSB method using bottlenose dolphin sonar signal. Red solid line shows the beam spread of receive transducer which is calculated by using two times the -3 dB beam width 120 kHz and red dotted line shows that of transmit transducer.

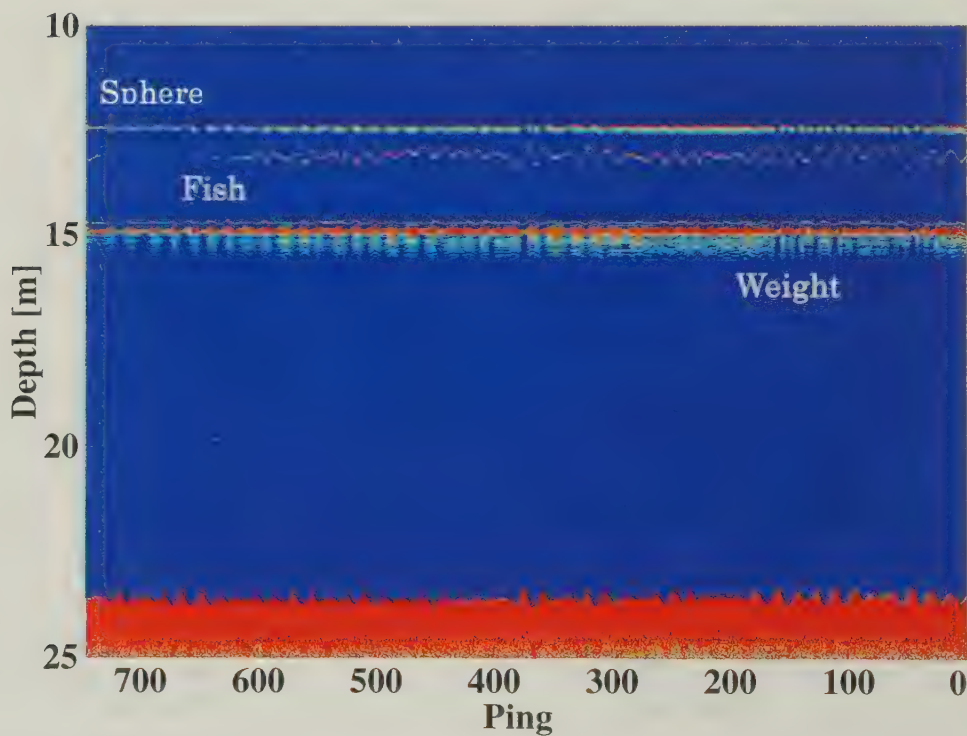


Fig. 6-4. Echogram of a tethered semi in situ fish and a tungsten carbide sphere at sea experiment using bottlenose dolphin sonar signal. X axis shows pings (375 s) and y axis shows depth of the targets.

これは5.4.2節で考えたアレイ中心間距離が変化するためであることを確かめた。

他のソーナー音を用いてもほぼ同じ結果を得られた。つまり、イルカのような広帯域の音波を用いても、相互相関処理を用いて時間差を検出できれば、対象の精確な位置角測定が可能である。

6.3 海上における TC 球の形状関数の測定

6.2節で、TC 球の位置角を精確に測定できることを示した。しかし、近距離であるために、送波器と受波器を同じ位置に設置できないことによる角度偏移が大きく、指向性関数を補正して、対象の形状関数を測定することがむずかしかった。そこで、本節では、対象までの距離を大きく取れ、角度偏移を小さくできる海上で、TC 球の反射波の計測実験を行った。

実験は、2007年10月に東京湾沖で、実習艇「ひよどり」を用いて、4.5節と同様に錨泊して、TC 球と、テグスで懸垂した準自然状態の魚の TS スペクトルを測定した。用いた送受波器支持具は、送波器と受波器の中心間距離が24.0 cm のもの (Fig. 5-3 (c) 参照) である。Fig. 6-4に、ハンドウイルカのソーナー音を用いて得られた、TC 球と準自然状態の魚の反射波を示すエコーグラムを示す。サンプリング周波数 5 MHz、音波の送信周期を0.5秒で実験を行った。12.5 m 付近に TC 球からの反射波がある。魚の結果については次節で述べる。

BSB 法を用いて、この TC 球の位置角を推定し、指向性関数を補正し、TC 球の形状関数を測定する。このとき、対象までの距離が12 m 以上であることから角度偏移は小さく、送波器と受波器の指向性関数が等しいとみなしても、大きな誤差にならない。また、海水であるため、4.4節同様に、海水の吸収係数項の補正も行う。

Fig. 6-5に BSB 法を用いて検出した TC 球の位置角 θ 、 ϕ と、パルスエコー法を用いて検出した TC 球までの距離 r の時間変化を示す。船の動揺や波浪の影響を受けており、位置角、距離が変化している。得られた位置角 θ の中で、使用する最高周波数である 120 kHz のビーム幅の 2 倍である 6.9° 以下の値のときの形状関数を求めた。位置角 θ が 0.81° 、 2.0° 、 4.0° 、 6.0° と、比較のために 7.6° のときに測定した形状関数 (比較のため指向性関数補正前も示す) を Fig. 6-6 示す。また、BSB 法とパルスエコー法を用いて得られた TC 球の位置を同時に示す。まず、受波ビーム主軸付近の結果である θ が 0.81° の時 (Fig. 6-6 (a)) は、指向性関数を補正する前と、補正した後 (形状関数) で大きな差がない。これは、測定された TC 球の位置がビー

ム主軸付近だからである。しかし、位置角 θ が大きくなるにつれ、指向性関数補正による効果が形状関数に現れている。つまり、指向性関数を補正することで、形状関数の理論値と実測値がよく一致しており、対象の広帯域での散乱特性を測定可能である。一方で θ が 7.6° の時 (Fig. 6-6 (e)) は、形状関数の理論値と実測値の一致がよくない。つまり、使用する最高周波数の 120 kHz のビーム幅の 2 倍の外側では精確に対象の散乱特性を得られない。

以上本節では、TC 球の形状関数を、BSB 法を用いて指向性関数を補正して求めた。受波ビームの主軸上になくても、使用する最高周波数のビーム幅の 2 倍以内であれば、対象の散乱特性、つまりは TS スペクトルを精確に測定可能であることが実証できた。

6.4 魚の TS スペクトルの測定

前節で、反射に指向性がない TC 球からの反射波に対して、BSB 法を用いて指向性関数を補正し、ビーム主軸付近に TC 形状関数を精確に測定できた。すなわち、受波ビーム主軸にない対象の TS スペクトルも広帯域で、精確に測定可能である。本節では、TC 球で確かめられた BSB 法を用いて、魚の TS スペクトルを測定する。

まず、TC 球と同時に懸垂した、準自然状態の魚の TS スペクトルを測定する。次に、この実験中に得られた自然状態の魚からの反射波に対しても、指向性関数を補正し、TS スペクトルを連続に求める。なお、本節で解析を行ったデータは、6.3節で示したハンドウイルカのソーナー音を用いたデータである。

6.4.1 準自然状態の魚の TS スペクトルの測定

Fig. 4-14に示したように、TC 球の 1 m 下に、鉛直テグスから枝状もしくは手綱状に 30 cm のテグスを結び、それに釣り針で活きた魚をつけた。このとき用いた魚は、尾又長が 21.1 cm のメジナ (*Girella punctata*) である。

Fig. 6-7に BSB 法を用いて検出した、この準自然状態の魚の位置角 θ 、 ϕ とパルスエコー法を用いて検出した魚までの距離 r の時間変化を示す。同時に検出した Fig. 6-5の TC 球の位置角変化と比べると、0-200 ビングの間などで位置角 θ 、 ϕ の変動が大きい。これらは、テグスに繋がった魚がビーム内を大きく暴れており、位置角が変化したためである。また、魚までの距離の変化を見ると、最大で 28 cm 魚が動いており、これは枝状に結んだテグスの長さとはほぼ等しい。

得られた準自然状態の魚の反射波において、検出された位置角が 6.9° 以下 (120 kHz における -3 dB ビ

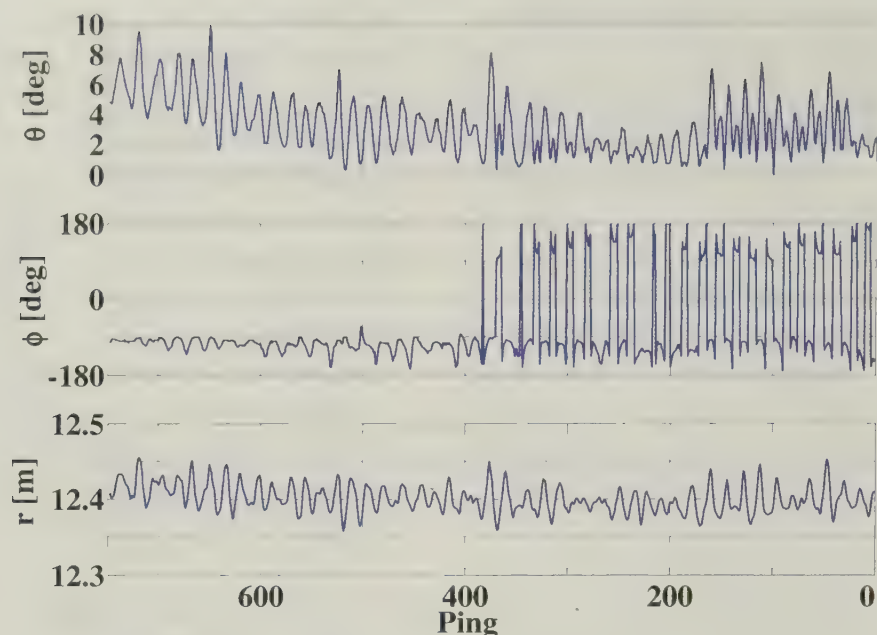


Fig. 6-5. TC sphere position angles, θ and ϕ (upper and middle), and the range between the transducers and TC sphere (lower) as a function of ping number, respectively. The x axis shows ping number (325 s)

ーム幅の2倍)のデータに対して、指向性関数を補正し、TSスペクトルを求めた。Fig. 6-8に代表として位置角 θ の値が等しいが、異なる時間の時に得られた準自然状態の魚のTSスペクトルを示す。(a)と(b)を比較すると、両者とも位置角 θ は 0.8° で、魚がビーム主軸近くにあるにもかかわらず、426ピング目(Fig. 6.8 (b))のTSスペクトルが、どの周波数に対しても小さい。これは、魚の反射波スペクトルが小さいのが原因である。つまり、魚の反射波のレベルが、姿勢変化などにより小さく、TSスペクトルに影響を及ぼしている。同様の方法で求めた400~430ピング(15s)間の準自然状態の魚のTSスペクトルをFig. 6-9に示す。この間、魚の上に吊るしたTC球の反射波より、位置角を求め、形状関数を求めたところ、TC球はビーム主軸付近にあり、位置角 θ はビーム幅の2倍である 6.9° 以下であり、精確な形状関数を求められている。魚のTSスペクトルは、時間と共に大きく変動しており、反射に指向性のないTC球のように、一定の値ではない。これらのTSスペクトルの変動は、4.6節における準自然状態の魚のTSスペクトル(TC球の反射波により指向性関数を補正、Fig. 4-17 (b))にも表れている。つまり、繫いだ魚が暴れ、それによる姿勢角変化によるTSスペクトルの変化を測定して

いると結論付けた。過去の研究と比較するために、単一の周波数である70 kHzと100 kHzの時のTS値に注目する。まず100 kHzでのTS値は、408ピングで41.7 dBの最大値をとり、-40 dBから-65 dBの間を激しく変動している。一方で、70kHzでは、424ピングで39.8 dBと最大値をとり、-39 dBから-65 dBを変動している。得られたTS値と魚の尾叉長を(4.5)式の基準化TSの式に代入し、姿勢平均の基準化TSを求めた。得られた70, 100 kHzにおける姿勢平均基準化TSと最大基準化TSは、それぞれ

	姿勢平均	最大
70 kHz	-72.8 dB	-66.3 dB
100 kHz	-77.3 dB	-68.2 dB

であった。最大、姿勢平均規準化TS共に、既往の研究で得られている有鰐魚の規準化TSの値よりも、小さい結果である。これは、テグスで吊るされた準自然状態の魚の激しい姿勢変化によりFig. 6-8 (b)のようにTS値そのものが、小さいことに起因する。

以上、広帯域のイルカのソーナー音でBSB法を用いて、海上において準自然状態の魚の位置角を推定し、TSスペクトルを測定した。この際、魚の1 m上に吊るしたTC球の形状関数を測定し、精確な散乱特性を得られていることから、準自然状態の魚のTSスペク

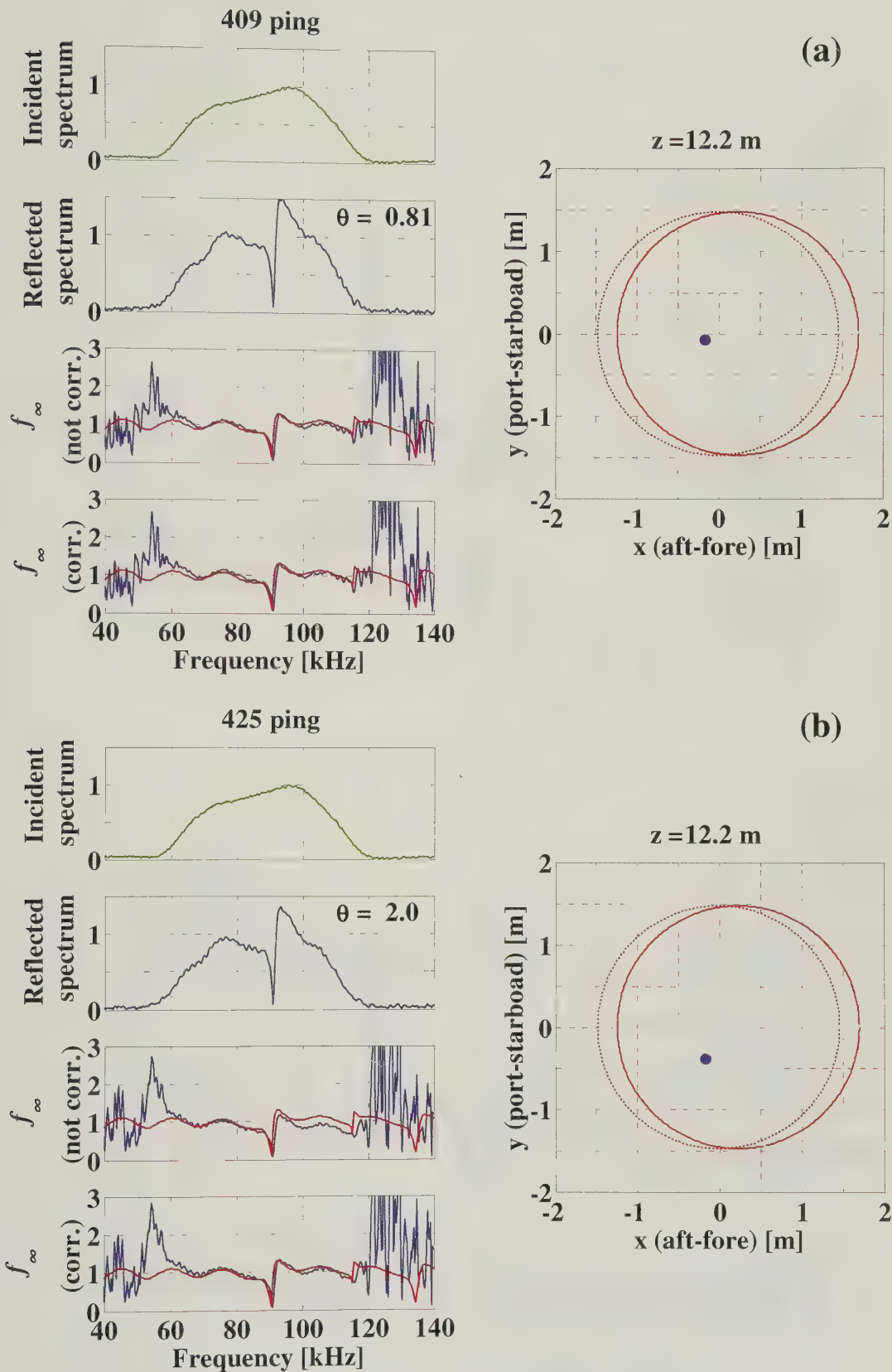
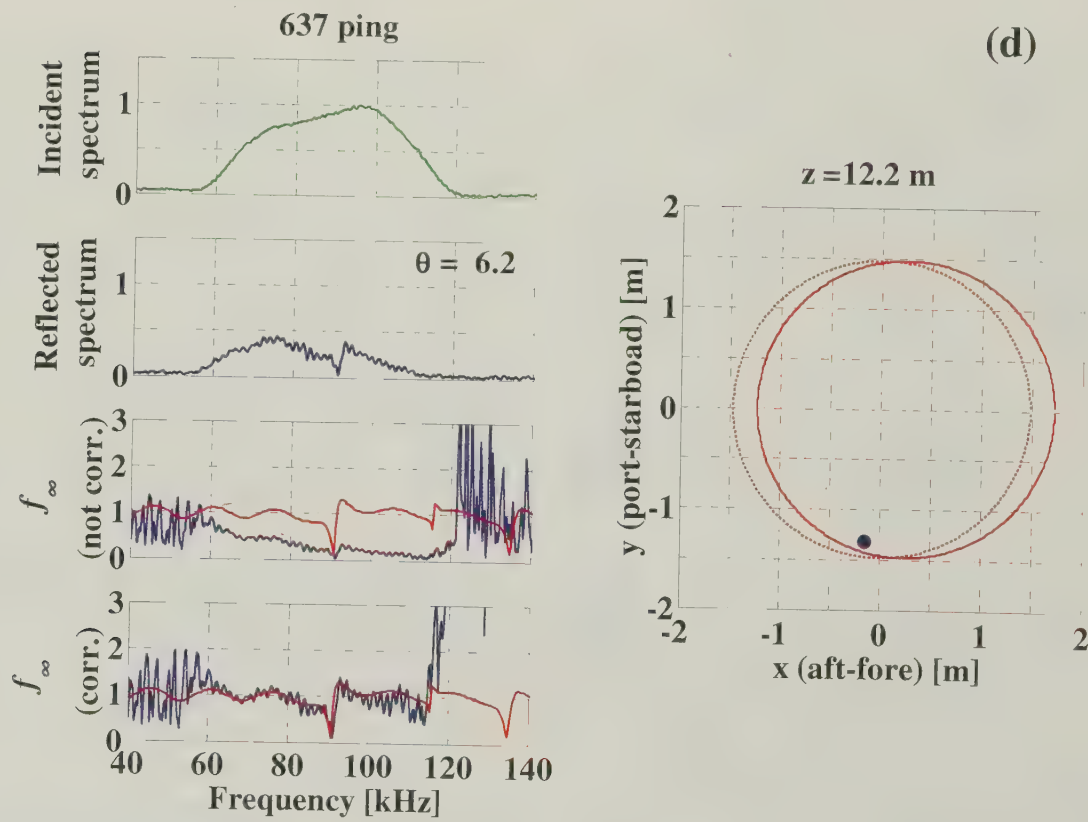
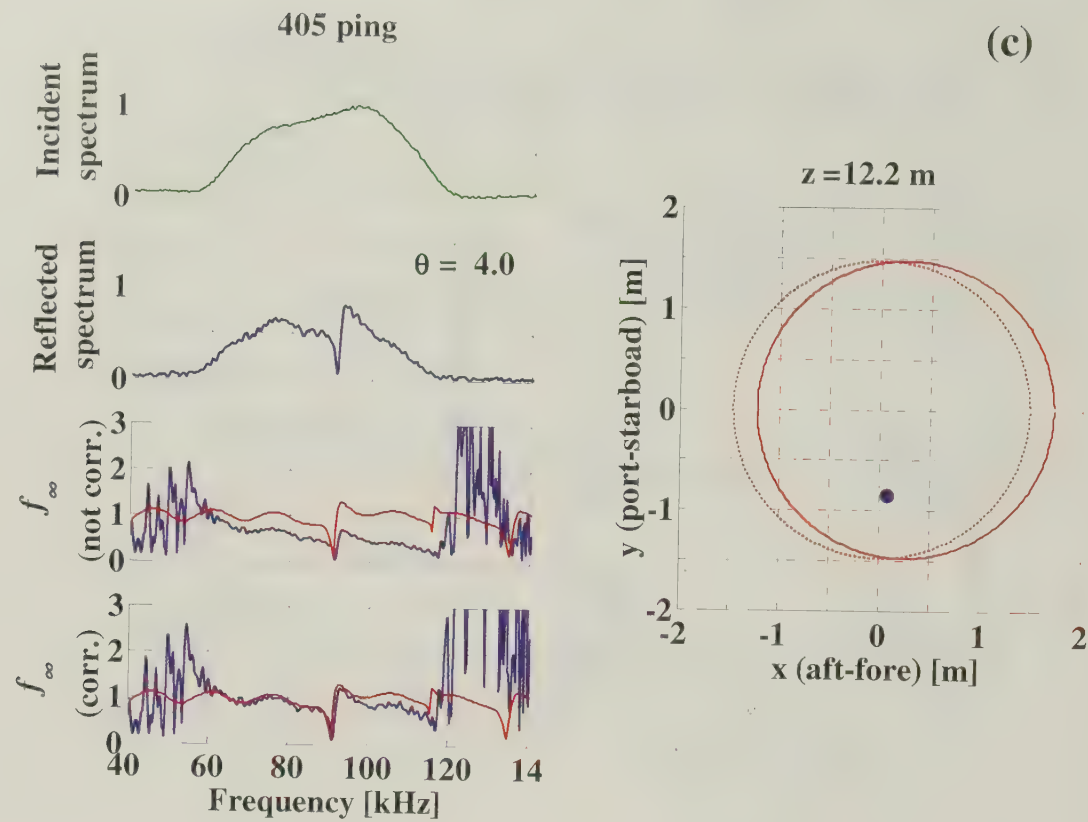


Fig. 6-6. The measured form function of TC sphere and sphere position using bottlenose dolphin sonar signal. Left side shows processes to calculate form function: amplitude spectrum of incident wave and reflected wave (first and second line), form function without directivity correction (third line) and final form function (forth line). In the form function figures, red line shows theoretical value and blue line shows measured data by the spectrum ratio method. Right side shows detected sphere position; red solid line shows the beam spread of receive transducer which is calculated by using two times the -3 dB beam width at 120 kHz, and red dotted line shows that of transmit transducer. The position angle θ for (a) to (e) are 0.81, 2, 4, 6, and 7.6 degrees, respectively.



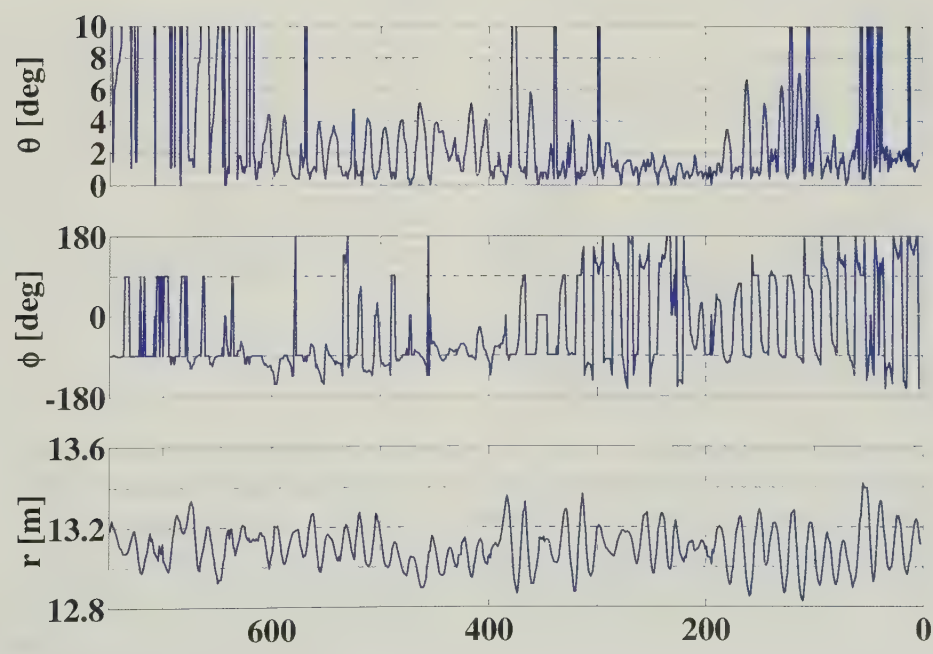
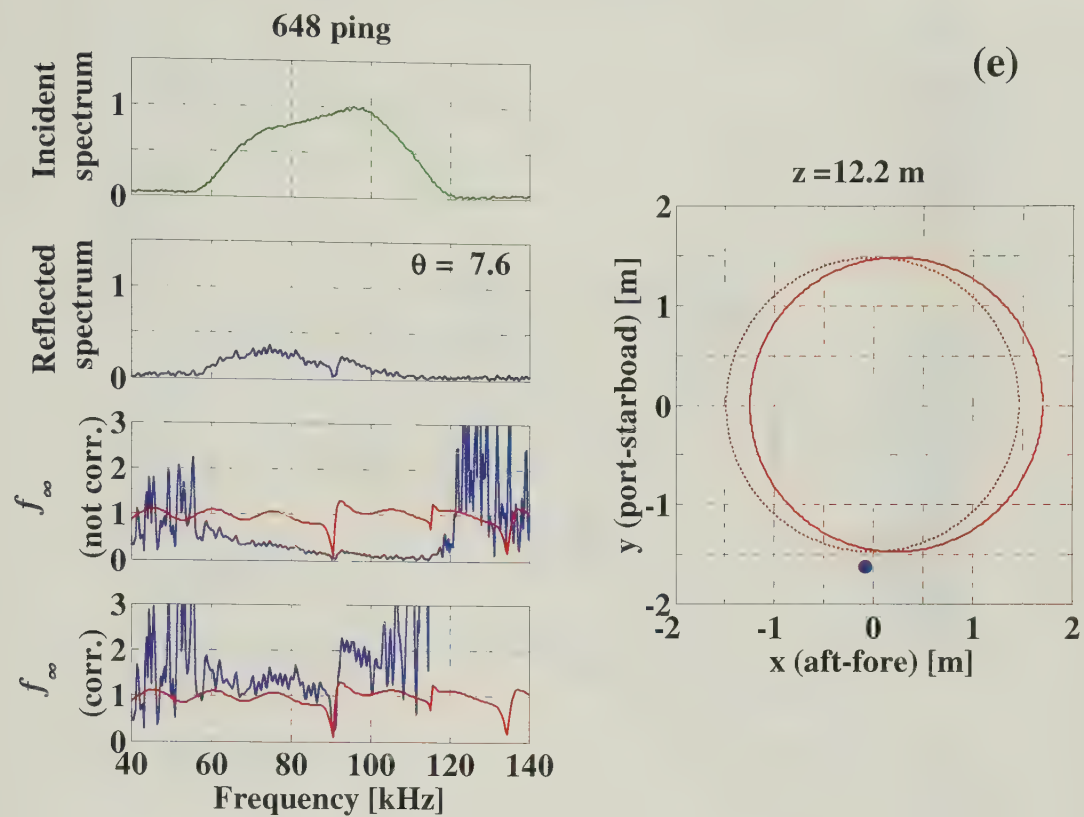


Fig. 6-7. Position angles θ and ϕ (upper and middle) of tethered fish, and the range between the transducers and the fish (lower) as a function of ping number, respectively. The x axis shows ping number (15 s)

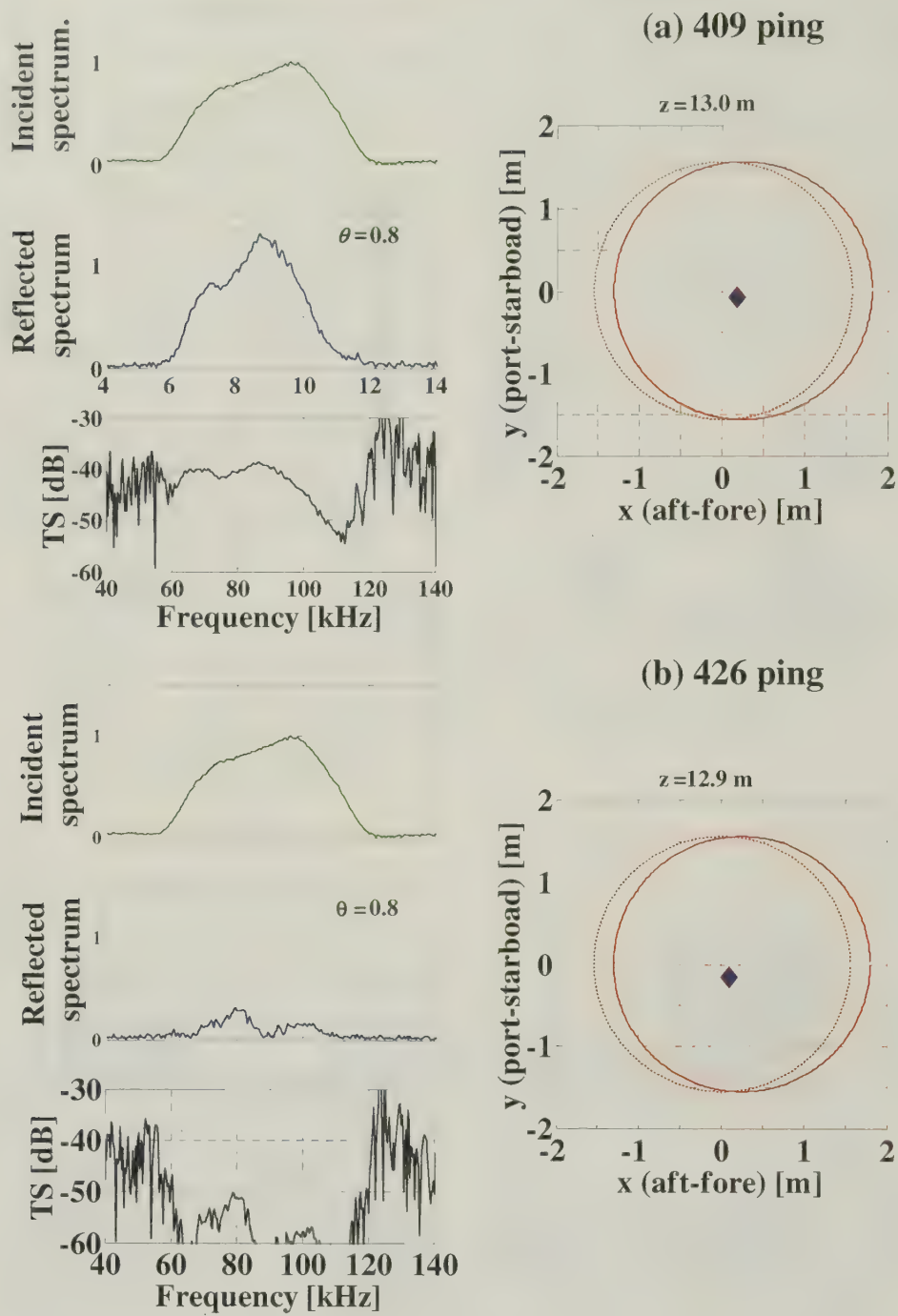


Fig. 6-8. The measured TS spectra of semi-*in situ* fish and fish position using bottlenose dolphin sonar signal. Left side shows processes to calculate TS spectra: amplitude spectrum of incident wave and reflected wave (top and middle), and TS spectra (lower). Right side shows detected the fish position; red solid line shows the beam spread of receive transducer which is calculated by using two times the -3 dB beam width at 120 kHz, and red dotted line shows that of transmit transducer. The measurements result of 409th ping (a), and 426th ping (b), respectively.

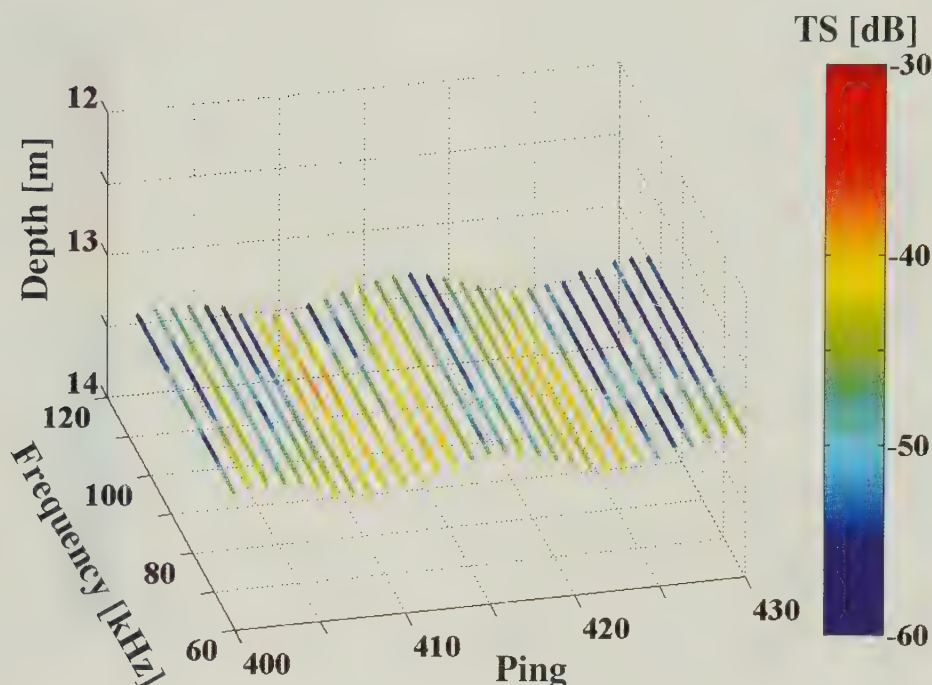


Fig. 6-9. Result of semi-*in situ* fish TS spectra using bottlenose dolphin sonar signal. The x axis shows ping number (15 s), the y axis shows frequency, the z axis shows depth, and color shows TS value.

トルにおいても、精確な値を得られたと結論付けられる。

6.4.2 自然状態の魚の TS スペクトルの測定

次に、上の実験中に得られた自然状態の魚の TS スペクトルを求める。Fig. 6-4の550ピングから700ピングにかけて、水面方向に移動する魚によると思われる反射波を取得したので、これを解析する。準自然状態の魚の TS スペクトルと同様に、検出した位置角が 6.9° 未満のデータに対して解析を行った。

得られた TS スペクトルの結果 (30ピング分, 15s) を Fig. 6-10に示す。この時の TS スペクトルの値は、 -60 から -48 dB の間を変動しており、653ピングでは、全体が -48 dB になっている。この魚は15sの間に約1.8 m 水面方向に移動しており、気泡などの平均的な上昇スピード (18 m/min) に比べると (吉田ら, 2002), ゆっくりと上昇している。また, TS スペクトルにも細かい変動 (100 kHz において最大で20 dB) があり, 姿勢変動による TS スペクトルの変化が観測できていると考えられ, この対象は自然状態の魚と考えられる。このように, 連続した TS スペクトルは, 対象弁別の基礎情報に資する。

以上本節において, 準自然状態の魚の TS スペクト

ルを測定し, 姿勢変動による TS スペクトルの変化を測定した。また, 魚と思われる反射波の TS スペクトルも連続で測定できた。このエコーは, 水深方向への移動スピードと, TS スペクトルの大きな変動から, 自然状態の魚からの反射波であると考えられる。

6.5 結 言

本章では, 前章で構築した広帯域スプリットビーム (BSB) 法の有効性と実用性を TC 球の形状関数を用いて確認し, また実際の魚の TS スペクトル計測に成功した。

まず6.2節において, 相互相関処理を用いて方位アレイ間の時間差を検出し, TC 球の位置角を水槽内で測定し, イルカのような広帯域のソーナー音を用いても, 対象の位置角を精確に測定できるのを確認した。

次に6.3節で, 海上において TC 球の形状関数を測定し, 指向性関数を補正することで, 使用する音波のビーム幅の2倍以内であれば, 対象の散乱特性, つまり, TS スペクトルを精確に測定可能であることを示した。

6.4節では, 同じく海上実験で, テグスに繋いだ準自然状態の魚と自然状態の魚の TS スペクトルを連続で測定した。この中で, 姿勢変動によると思われる

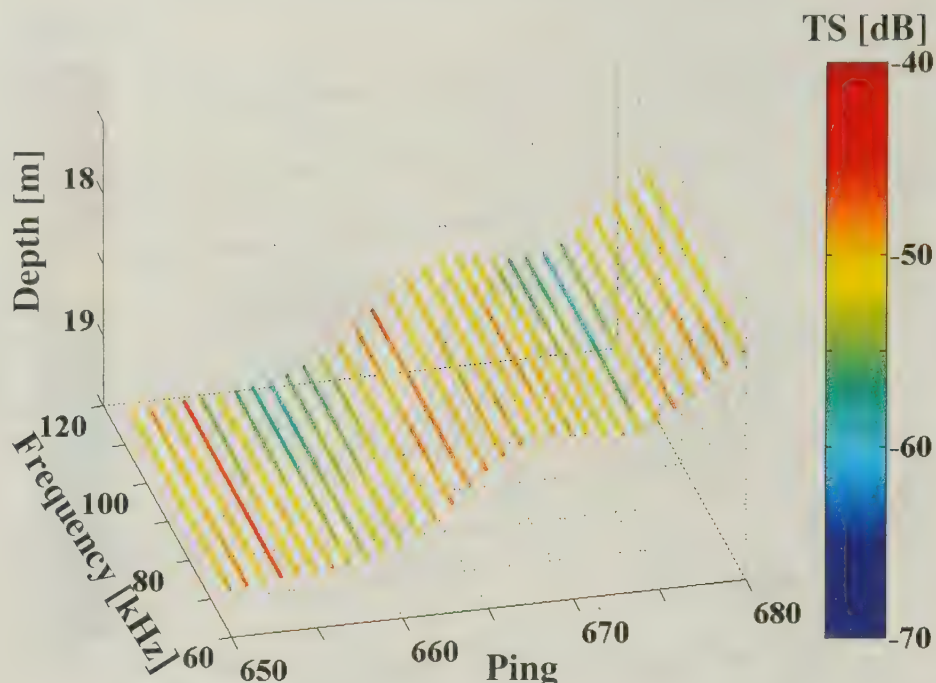


Fig. 6-10. *In situ* fish TS spectra using bottlenose dolphin sonar signal. The x axis shows ping number (15 s), the y axis shows frequency, the z axis shows depth, and color shows TS value.

TS スペクトルの変動や、水深方向での移動距離などにより、対象識別の情報を抽出可能であるのが示唆された。

第7章 イルカのソーナー音の魚群探知機への適用に向けて

7.1 緒 言

前章までで、イルカのソーナー音を人工的に送受波して、高い分解能を有した状態で、魚などの対象固有の散乱特性である自然状態での TS スペクトルを、ビーム内であれば測定するのに成功した。そこで展開した内容は、主にイルカのソーナーの広帯域で短パルスという特長を活かした、広帯域スプリットビーム (BSB) 法という形で結実させた。イルカのソーナー音もしくはエコー処理には、それ以外にも活用できる特長があると考えられる。一方で、例えば大きな音を長時間発生できないなど、生物ソーナーとしての制限もある。

本章では、実際にイルカのソーナー音を魚群探知機に適用する上でのメリットや問題点について考察し、将来のイルカ型の魚群探知機やソーナー開発に向けての検討や提案を行なう。

7.2 節では、広帯域ソーナー音の信号対雑音比が小さくなるという弱点を緩和するための手法として、相互相関処理を用いて信号対雑音比の向上を試みる。第7.3 節でイルカのソーナー音の特徴について工学的検知から考察する。7.4 節で、イルカのソーナー音の魚群探知機への適用の提案を行う。

7.2 相互相関処理による信号対雑音比の向上

一般的に広帯域信号では高い信号対雑音比を得ることが難しい。しかし実際の海においては、雑音環境はよくなく、魚群探知機などのような計測機器を運用する上で、一般的に高い信号対雑音比で魚からの反射波を得るための工夫が必要である。しかし、ソーナー方程式などで示したように、(2.2 節) 拡散による減衰、海水の音波吸収による減衰は、避けることは出来ず、また環境雑音や自船の発する雑音など、多くの雑音がある。そこで、様々な方法により信号対雑音比 (以下 SN 比) を上げる工夫がされている。具体的には、

- (1) 送波音圧をキャビテーション発生の寸前まで上げ、信号のレベルを上げる
- (2) 送波、受波に指向性を持たせ、指向性利得を得る
- (3) 平均化やフィルタリングといった後処理を用い

る
などである。本研究では、(1)、(2)のようなシステム自身よる利得は、現状ではこれ以上大幅には望めない。そこで、(3)の後処理（または受信処理）による SN 比の向上を試みる。具体的には、整合フィルタ処理に等価な相互相関処理を行い、信号対雑音比の向上を試みる。

Fig. 7-1に、SN 比算出のための、信号レベルとノイズレベルの定義を示す。信号レベルは、反射波の振幅の最大値を実効値にした値を、ノイズレベルは、その最大値から各ソーナー音の入射波のパルス幅の15倍前からパルス幅分を、平均した値をノイズレベルとした。入射波のパルス幅はそれぞれ

短バースト	20 μs
ハンドウイルカ	24 μs
スナメリ	42 μs

である。SN 比は、信号音圧レベルを S 、ノイズレベルを N とすると、

$$R_{SN} = 20\log \frac{S}{N}$$

(7.1)

と表せる。(7.1) 式を用いて、相互相関処理を行う前の生のデータと、相互相関処理後のデータで SN 比をそれぞれ求めた。解析対象は、4.3 節で用いた海上実験での TC 球からの10ピング分の反射波を用いた。

相互相関処理に用いた参照波（レプリカ）は、水槽実験で計測した各ソーナー音の入射波を用いた。

Fig. 7-2に代表としてハンドウイルカのソーナー音を用いて求めた相互相関処理の結果を示す。生の反射波よりも、相互相関処理を行ったもののほうが TC 球の前のノイズ成分が軽減されている。これらの SN 比を求め、各ソーナー音で10ピング分の解析結果を平均し比較した。結果を Fig. 7-3に示す。どのソーナー音を用いても、相互相関処理を行った後の SN 比の方が、元の信号の SN 比よりも高い。各ソーナー音における相互相関処理を用いて得られた SN 比の平均利得と最大利得は、

	平均利得[dB]	最大利得[dB]
短バースト波	5.3	11.4
ハンドウイルカ	7.7	14.3
スナメリ	9.2	16.1

であった。同じようなパルス幅の短バースト波とハンドウイルカのソーナー音では、ハンドウイルカの方が相互相関処理による利得が大きい。また、平均、最大利得共に、スナメリのソーナー音を用いた場合が最も良くなった。つまり、人工のソーナー音よりも、イルカのソーナー音を用いた方が、相互相関による利得が大きい。

この特長を活かす試みを行なった。Fig. 7-4(a)は、

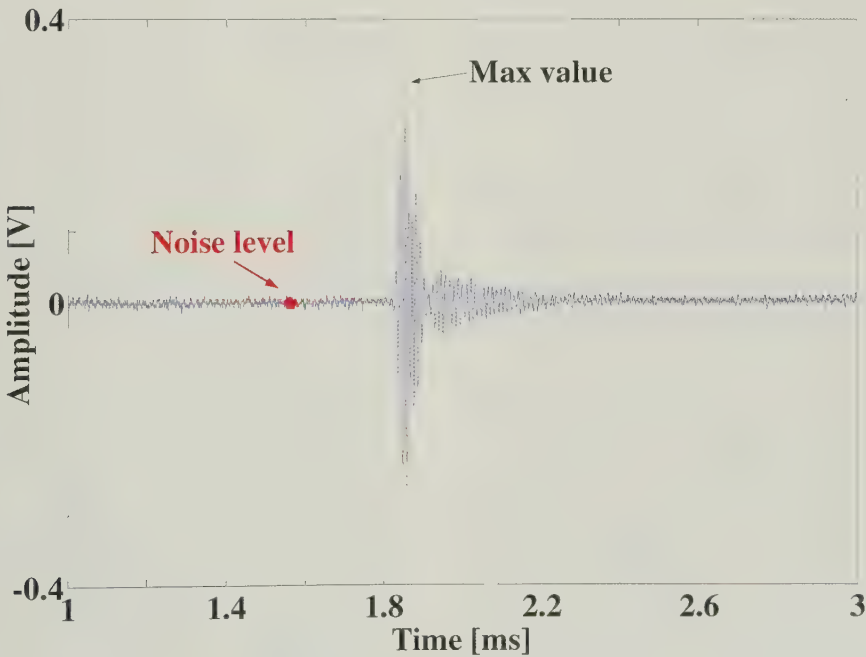


Fig. 7-1. The definition of the noise level and the signal level. The signal level are defined that changing the maximum amplitude value (V_p) to effective value (V_{rms}). From before 15 times the pulse duration, the noise level made the pulse duration minute to be the noise level from the maximum value (Red color).

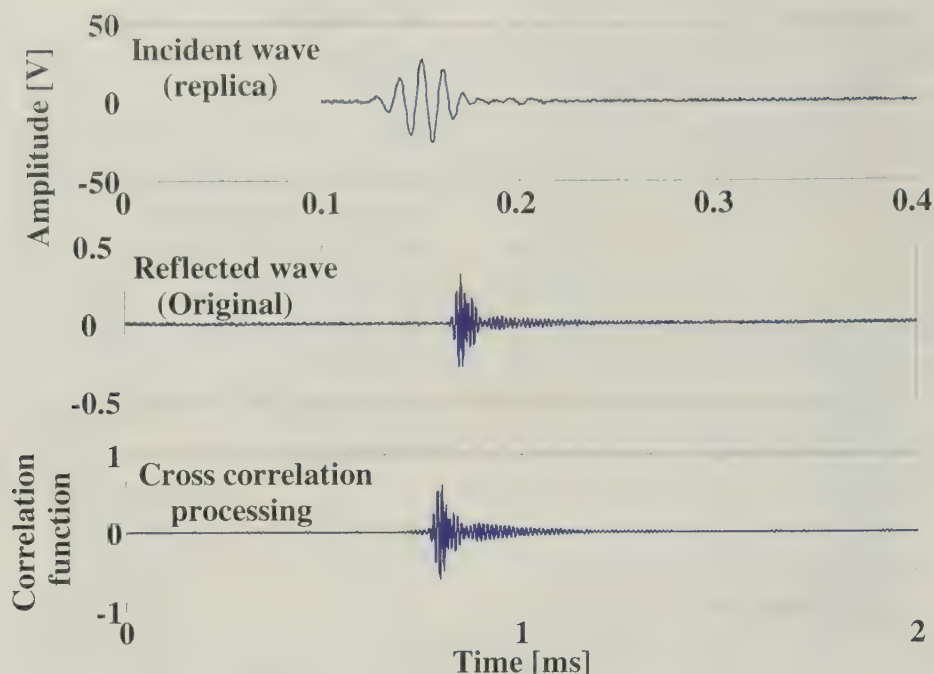


Fig. 7-2. The result of cross correlation processing. The reflected wave from the tungsten carbide sphere (top), the incident wave form as replica (center), the result of correlation function by cross correlation processing.

6.4節で解析をした、ハンドウイルカのソーナー音を用いて取得した準自然状態の魚からの反射波のエコーグラムの拡大図である。TC球、魚、錘が分離できているが、そのほかの部分（水深14 mなど）で、雑音があり、SN比が悪いのがわかる。そこで、広帯域のイルカのソーナー音を活かすために2つの検討を行った。まず1つ目は、必要帯域のみを通す、バンドパスフィルタ処理によりSN比を改良することを試みた。バンドパスフィルタ処理は、40-140 kHzの帯域で、直線位相型のFIRフィルタを用いた。次に、フィルタをかけた上で、先に述べた方法である相互相関処理を行った。相互相関処理は、整合フィルタであり、フィルタ処理の一種である。この時レプリカに用いたのは、任意のピングのときの魚からのエコーを用いた。フィルタリングによる結果をFig. 7-4 (b)に、フィルタリング後に相互相関処理を行った結果をFig. 7-4 (c)に示す。バンドパスフィルタをかけただけでも、元のエコーグラムにあるような雑音成分が軽減され、かなり高いSN比になっているのがわかる。次に、相互相関処理を行った場合は、レプリカに魚からのエコーを用いているので、準自然状態の魚の信号が強くなっており、また(b)と(c)を比較するとさらに、雑音成分が取り除かれているのがわかる。つまり、どちらの手法も、イルカのような広帯域音波の送受波に

おいて、雑音成分を除く働きがあり効果的な雑音対策だといえる。

イルカのソーナー音は、大きくハンドウイルカ型とスナメリ型に別れることを2.5節で述べた。送波音圧の最大値は、ハンドウイルカで220 dB re μPa at 1 m, スナメリで180 dB re μPa at 1 m程度との報告がある(2.5節参照)。このような2種類のソーナー音に別れる理由には2.5節でも述べたとおり諸説がある。ここでは、工学的見地から考察を行う。上記に述べたSN比を向上させる方法は、(1)の場合、生物の場合も人工のソーナー同様にキャビテーションの発生という限界がある。そこで、人工ソーナーの場合は、220 dB程度のキャビテーション発生限界の音波を常時発生するのが通常である。それに対してイルカは、自然界を生き抜くために、効率の良い探査を行っていると考えられるが、使用できるエネルギーには限りがあり、送波音圧に限界があると考えられる。したがって、送波レベルは一般に人工ソーナーに較べ小さい。次に、(2)の送波受波に指向性を持たせ、利得を得ている点に関しては、様々なイルカは魚群探知機並みの指向性利得を持っていることが知られている(Au, 1993)。さらに、イルカは広帯域音を用いるので一般にSN比を高くとりにくい。つまり、低めの送波音圧で広帯域音を用いて探査するためには、何らかの脳内

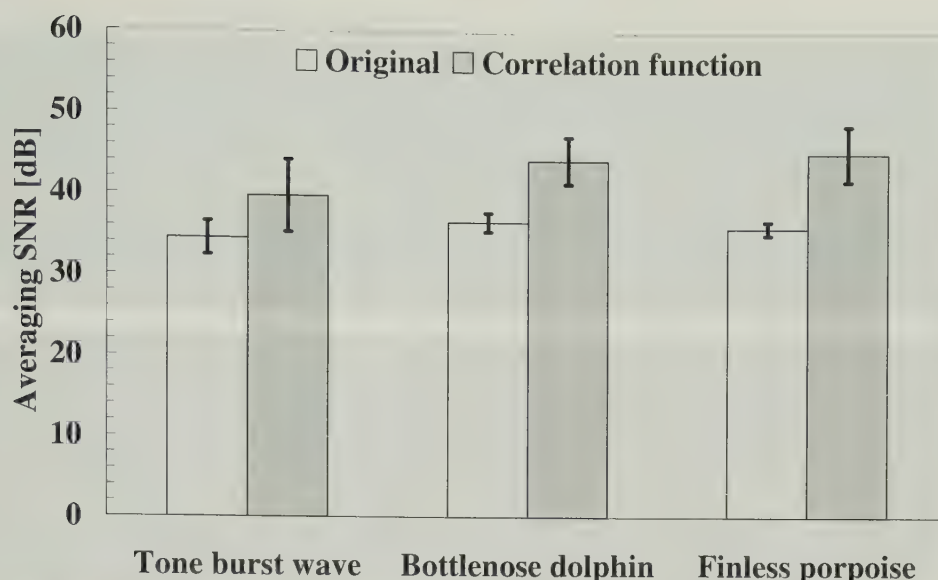


Fig. 7-3. Comparison of averaging signal per noise ratio between original reflected wave from TC sphere and cross correlation processing.

での処理を行わなければ、対象までの距離が100 m以上離れて、高い確率で、大きさ、材質、形状などを弁別することは出来ないと考えられる。つまり、(3)の処理利得が大きいと推察できる。

上記の相互相関処理の実験では、自然界のイルカのソーナー音のレベルではなく、人工のソーナーとほぼ同じ送波レベルを用い、ソーナー音ごとの処理利得を調べた。解剖学的検知から述べられた考察として、スナメリは体が小さいためにハンドウイルカのような広帯域で大きな音圧を出すことが出来ないと考えられ (Au, 1993; Space and Naval Warfare Systems Center, 1998), ハンドウイルカよりかなり狭帯域の音波を用い (Fig. 2.5 参照) 帯域フィルタに似た処理で、雑音の多い海中での探査を行っていると考えられる。Altes らは、イルカのソーナーでは、相関処理などにより SN 比を大きく改善しないとしている (Altes *et al.*, 2003)。しかし、複数のパルス列を用いることにより、SN 比が向上するとしている。本研究では、若干ではあったが、短バースト波を用いた結果よりも SN 比の向上が見られた。また、イルカが処理利得を利用して、識別を容易にしている点では、本研究と同じ結論である。このイルカのソーナー音を用いた処理利得（フィルタリング、相互相関処理、フーリエ変換、ウェーブレット変換）に関する研究は多く行われており（例えば、Huang and Solorzano, 1991）、高い SN 比を得るためには、まだ研究が必要である。

以上、本節ではイルカのソーナーと人工のソーナーの SN 比および処理利得について検討し、イルカのソーナー音を人工ソーナーに適用する場合、相互相関処理をすることで、広帯域信号の SN 比が小さくなるという弱点を緩和できることを示した。

7.3 イルカのソーナー音の特徴

イルカのソーナー音は、広帯域、短パルスという特性を持っている。このソーナー音を使うことの利得を多くの研究が明らかにしようとしてきた。これらの研究は、大きく分けると、周波数解析を行うものと、反射波信号の継続時間や振幅のピークに注目するもの、その両者に分けられる。

Au はハンドウイルカが数 mm の厚みを検出できるのは、反射波のスペクトルにタイムセパレーションピーチと呼ばれるノッチが現れ、それらを距離に換算することで、厚みを検出できるとしている (Au, 1993)。また、Au and Benoit-Bird は、イルカの音波を人工的に送受波し、鰐の軟 X 線写真と実際の魚の反射点を推測し、モデルにより検証を行っている (Au and Benoit-Bird, 2003b)。これらの研究に代表されるように、イルカの広帯域のソーナー音の利用により、広帯域の反射特性を得られ、特に対象識別に効果が期待できる。本研究でも、対象に固有の TS スペクトルの計測という形で、その効果を実証した。このような広帯域性の利用方法に関しては、今後ともさらなる研究が必要であろう。

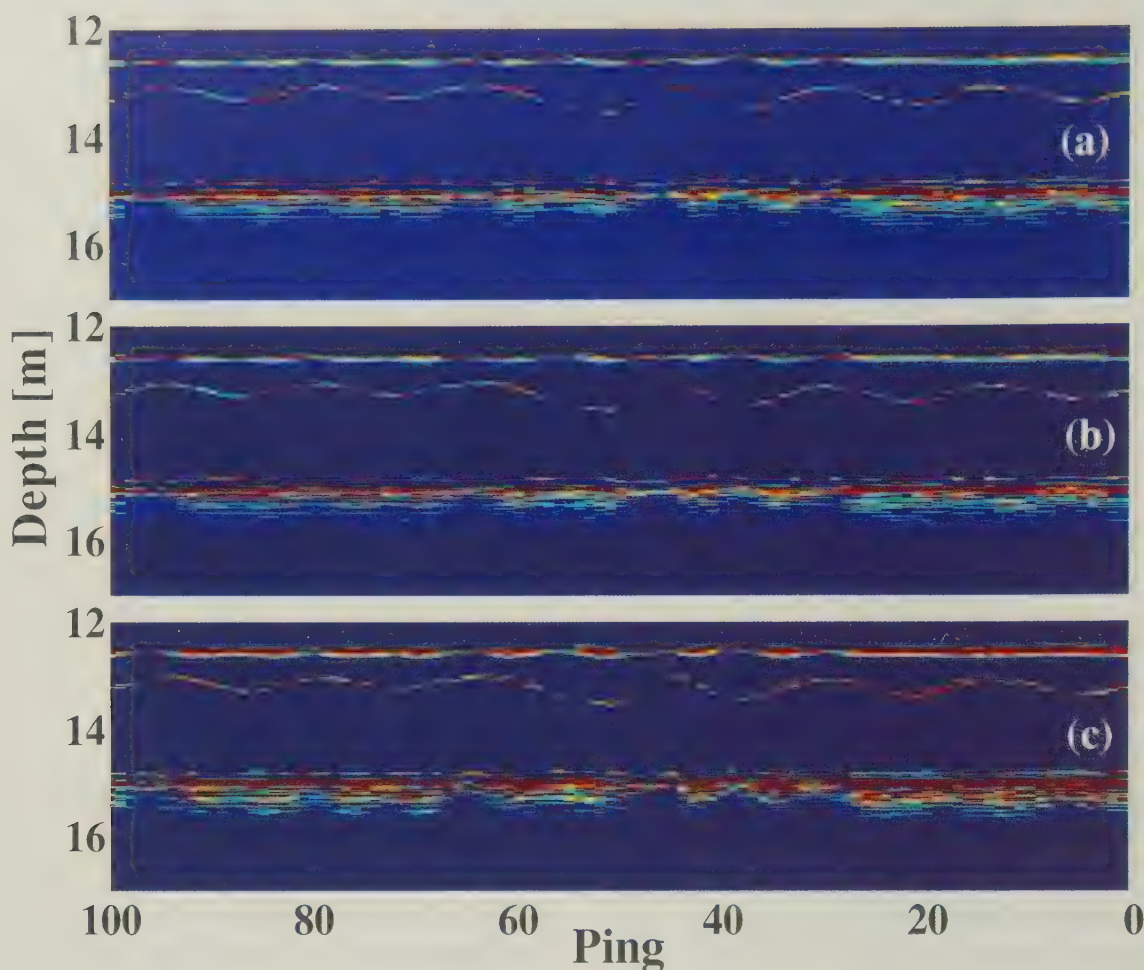


Fig. 7-4. Comparison of the signal processing results, the original echogram (a), band pass (40kHz - 140kHz, FIR filter) filtering (b), and cross correlation processing with filtering (c).

また一方で、イルカのソーナー音の送波の方式も人工ソーナーにはない仕組みがある。イルカと対象までの距離が短くなれば、彼らは送波する音圧を下げるが、送波する頻度は増える (Au and Benoit-Bird, 2003a)。これは、同じくバイオソーナーであるコウモリも同じ傾向がある。イルカもコウモリも餌と思われる対象を見つけると、標的を定め、パルスの送信間隔を変化させて、対象へと近づいていく。この時の音波の送信間隔と、移動距離に関係があるのが確かめられている。また、標的として定めた対象からの多くの反射波を取得し、対象の情報の確度を向上させていると考えられる。このような機能を人工ソーナーに適用するとするとは、Autonomous Underwater Vehicle (AUV) などの水中を移動可能なシステムの場合は良いが、船につけるような人工ソーナーとしては、適用できない。しかし、標的を定め、情報の確度を高める

るという方法は有用である。2.3節で示したエコートレース解析などで、詳細に知りたい部分をより多くの情報を取得し、確度を高めるといった点で、イルカのような可変の送信間隔、標的を定める手法は有効である。

以上見てきたように、イルカのソーナー音の大きな特徴は、広帯域、短パルス、対象に応じた送波方式であるが、それ以外にも混信回避や、7.2節で検討したような信号対雑音比の向上のための後処理方法など、多くの利点が考えられる。本研究では、広帯域、短パルスという2つの特徴に焦点をあて、人工ソーナーへの適用技術として、広帯域スプリットビーム法を開発した。処理利得や混信回避といった部分では、未だ研究の余地がある。

7.4 イルカのソーナー音の魚群探知機への適用の提案

本節では、イルカのソーナー能力と人工のソーナーのメリットを整理し、両者のメリットをまとめ、実際の魚群探知機への適用を考える。

まず、広帯域、短パルスのイルカのソーナーのメリットは、下記のように整理される。

- 1) 高分解能化による自然状態の TS 測定制限の緩和
- 2) 広帯域の TS スペクトルによる魚種識別情報の増加
- 3) 魚の TS 特性の解明のための情報増加
- 4) 相互相関処理などにより広帯域の信号対雑音比低下という弱点を緩和

一方で人工のソーナーのメリットは、下記のように整理される。

- 1) キャビテーション寸前までの大きな送波音圧を継続使用可能
- 2) 規則的な制御・処理により精密解析が可能
- 3) TS などの反射の指標を、サイズ、行動、魚種推定などの有用な情報にする

実際にイルカのソーナー音を魚群探知機に適用する際には、信号対雑音比が問題になるが、イルカのソーナー音のメリットの1つである処理利得と、人工のソーナーのメリットである大出力を連続送信可能という両者を、合わせて用いることが望ましい。また、イルカのソーナー音で得られる対象の広帯域の反射特性は、人工ソーナーの財産としての既往の研究成果と比較し、対象識別情報に結びつけるべきである。そして、イルカのソーナー音の特長である短パルスを用いることで、自然状態の TS 測定の限界点の緩和に繋がる。以上をまとめると、

- 1) 人工ソーナーのメリットである送波音圧を最大限まで活用
- 2) イルカのソーナー音のメリットである短パルスを用いて、群れからの反射波を単体魚の集まりとして測定可能
- 3) イルカのソーナー音のメリットである広帯域信号を用い処理利得の向上
- 4) 定量的で広帯域の TS スペクトルに、既往の研究成果を結びつけることにより、サイズ、行動、種の判定や推定に発展

となる。将来システムでは、提案したような人工ソーナーとバイオソーナーの両者のメリットを融合させ、現状よりも多くの情報を精度が高く得られるようになるであろう。

7.5 結 言

7.2 節では、イルカのソーナー音によるエコーに相互相関処理を行い、8 dB 程度の処理利得が得られた。これは人工のソーナー音を用いるよりも高い信号対雑音比である。これにより SN 比の低下という広帯域音の弱点を相当に緩和できる。

7.3 節では、イルカのソーナーと人工のソーナーの長所と欠点をまとめ、比較し、両者のメリットを融合させるべきとの提案を行った。

7.4 節では、イルカのソーナー能力と人工のソーナーのメリットを整理し、両者のメリットをまとめ、実際の魚群探知機への適用について述べた。

以上、本章では実際にイルカのソーナー音を魚群探知機に適用する上でのメリットや問題点について考察し、将来のイルカ型の魚群探知機やソーナー開発に向けての検討や提案を行なった。

第8章 結 論

8.1 まとめ

本研究では、イルカのソーナー音の短パルス、広帯域という特性に注目し、実際にイルカのソーナー音を送受波し、広帯域の反射特性を高分解能で測定した。これらは、自然状態ターゲットストレングス (TS) 測定の測定条件の緩和、魚種識別などのための情報の増強につながり、現状の音響資源調査における問題点の解決に資する。

本研究における主な成果を以下にまとめる。

- 1) 広帯域のイルカのソーナー音を用いて、2 種類の異なる材質の金属球の形状関数を測定し、スペクトル比法を用いた対象の反射の周波数特性 (TS スペクトル) の正確な測定方法を確認した。
- 2) 麻酔をかけた魚の TS スペクトルを測定し、魚種、個体、姿勢角による TS スペクトルの変化を調べた。TS スペクトルの連続取得が、対象の行動情報推定に繋がり、魚種識別の情報になることが示唆された。
- 3) 海上において、自然状態の魚の探知実験を行い、イルカのソーナー音の適用による高分解能なエコーを取得した。また、送受波器の指向性関数の補正を試みて、金属球が較正だけでなく、指向性関数の補正にも使用できることを確認した。
- 4) 広帯域信号を用いたスプリットビーム (BSB) システムと処理方法を新規に開発した。タングステンカーバイド球を用いて、ビーム主軸上にない場合も、指向性関数の補正が行え、形状関数を正確に計測できることを示した。

- 5) BSB システムにより、イルカのソーナー音を用いて指向性関数を補正して自然状態の魚の TS スペクトルを測定することに成功した。
- 6) イルカのソーナー音の広帯域性に伴う信号対雑音比の低下を、相互相関処理により 8 dB 程度改善できることを示した。
- 7) 今後イルカ型の人工ソーナーを開発するために、イルカのソーナー音のメリットと人工のソーナーのメリットをまとめ、両者を合わせた提案を行った。

以上述べた本研究の成果は、特に魚種識別に道を拓くことから、音響を用いた水産資源量調査方法や漁業用音響機器の発展に大きく寄与するものと考ええる。

8.2 今後の課題

以下に今後の課題を述べる。

まず、本研究での実験システムは、市販のパワアンプを使用したために、出力が最大で 1 kW と、通常の計量魚群探知機などに比べると、小さい。そこで、よりさらに大出力のパワアンプを用いる、パワアンプとのインピーダンスマッチングをとるなど、送波音圧を上げ、より広い範囲を探知・計測する必要がある。また、これに伴い、処理利得の方法も検討し、より高い SN 比を得る必要がある。

次に本研究では、すべての解析をオフラインで行った。これを一般の調査で使えるように、計算アルゴリズムなどを工夫し、実用レベルに引き上げる、つまりは、広帯域スプリットビーム法の実用レベル化が求められる。

最後に、本研究では、TS スペクトルを魚種推定のための情報に直接結びつけることができなかった。そこで、さらに魚の TS スペクトルの特性を測定するとともに、現在あるモデルと比較し、より確度の高い魚種識別のための基礎情報に繋げられるようにする。つまり、TS スペクトルの連続情報による魚種識別方法の開発である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、東京海洋大学海洋環境学科、海洋計測学研究室の名誉教授古澤昌彦博士には、終始御指導、御鞭撻を受け賜りましたことを厚く御礼申し上げます。海洋安全工学研究室の武田誠一博士には、多大なる御協力と御指導をいただきました。深く感謝申し上げます。また、独立行政法人水産工学研究所の赤松友成博士には、研究に多大なる協力と、指導をしていただきました。御礼を申し上げます。研究を進め

るに当たり、本研究室卒業生で、先端科学技術センター助教の甘糟和男先生にも多くの助言、助けをいただきました。厚く御礼を申し上げます。

海洋計測学研究室の准教授岡本峰雄博士、助教樊春明博士には本論分の取り纏めにあたり、多くの御助言をいただきました。また、御教示と御校閲を賜った応用情報システム工学研究室の教授柿原利治博士、准教授宮本桂則博士に深く感謝するとともに、平素御助言をいただいた千葉工業大学精密工学研究室の教授白井靖幸博士、東北学院大学情報科学科の准教授である松尾行雄博士に感謝の意を表します。

本研究で使用したすべてのシステム設計を株式会社古野電気との共同研究で行いました。株式会社古野電気の技術研究所研究部西森 靖室長、小河慎二主任研究員、船舶機器事業部音響開発課の西田 優主任を始めとして多くの方に、多大なる御協力、御助言をいただきました。厚く御礼を申し上げます。

東京海洋大学実習艇「ひよどり」の酒井一英艇長、深草啓司元機関長、川上長、山根勝行機関長には、4 章、6 章の海上実験において、多大なる御協力をいただきました。深く感謝いたします。

水産工学研究所、資源情報工学研究室長の高尾芳三室長、澤田浩一主任研究員、安倍幸樹研究員、には第 5 章における水槽実験でお手伝いをいただきました。厚く御礼申し上げます。

共同で実験を行った、重竹誠二さん、原口裕子さん、豊田陽子さん、小田川絢さん、実験を手伝ってくれた元吉敏和さん、宮城亜紀さん、松裏知彦さん、小川誠記さん、山口 諒さんに御礼を申し上げます。また、海洋計測工学研究室の学生諸子には、本研究に対する御協力、御助言を日々いただくと共に充実した毎日が送れたことを深く感謝申し上げます。

また研究を行うにあたり、多大な御協力をいただきました、元全日本潜水連盟の須賀次郎理事長、海洋哺乳類の研究の面白さを教えていただきました、故鳥羽山照夫博士に感謝の意を、科学の道を示してくれた故今泉古典博士に敬意を表します。

本研究は、独立行政法人農業・生物系特定産業技術研究機構 生物系特定産業技術センター「新技術・新分野創出のための基礎研究推進事業」、「生物系産業創出のための異分野融合研究支援事業」日本学術振興会「科学研究費補助金」の援助をいただきました。御礼を申し上げます。

本研究は、ここに書ききれないほどの人たちに支えてもらい、見守られ、遂行出来ました。感謝の意を表します。

最後に在学中、生活、精神のすべての面で支えてい

ただいた、両親、兄、祖母に感謝します。

参考文献

- Akamatsu T., Wang D., Nakamura K., and Wang K., 1998: Echolocation range of captive and free-ranging baiji (*Lipotes vexillifer*), finless porpoise (*Neophocaena phocaenoides*), and bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*). J. Acoust. Soc. Am. **104**, 2511-2516.
- Altes R. A., Dankiewicz L. A., Moore P. W., and Helweg D. A., 2003: Multiecho processing by an echolocating dolphin. J. Acoust. Soc. Am. **114**, 1155-1166.
- 甘糟和男, 2005: 音響によるナンキョクオキアミの計量方法に関する研究, 博士論文, 東京水産大学, 東京, pp.43
- Amundin M., 1991: Sound Production in Odontocetes with Emphasis on the Harbour Porpoise *Phocoena phocoena*, Ph. D. dissertation. University of Stockholm, Kingdom of Sweden.
- Au W. W. L., 1993: The Sonar of Dolphins, Springer-Verlag, New York.
- Au W. W. L., and Benoit-Bird K. J., 2003a: Automatic gain control in the echolocation system of dolphins. Nature, Vol. **423**, 861-863.
- Au W. W. L., and Benoit-Bird K. J., 2003b: Acoustic backscattering by Hawaiian lutjanid snappers II. Broadband temporal and spectral structure. J. Acoust. Soc. Am. **114**, 1118-1123.
- Au W. W. L., Benoit-Bird K. J., and Kastelein R. A., 2007: Modeling the detection range of fish by echolocating bottlenose dolphins and harbor porpoises. J. Acoust. Soc. Am. **121**, 3954-3962.
- Benoit-Bird K. J., Au W. W. L., Kelley C. D., and Taylor C., 2003: Acoustic backscattering by deepwater fish measured in situ from a manned submersible. Deep-Sea Res., Part I **50**, 221-229.
- Benoit-Bird K. J., Au W. W. L., and Kastelein R. A., 2006: Testing the odontocete acoustic prey debilitation hypothesis: No stunning results. J. Acoust. Soc. Am. **120**, 1118-1123.
- Capus C., Paihas Y., Brown K., Lana D. M., Moore P. W., and Houser D., 2007: Bio-inspired wideband sonar signals based on observations of the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*). J. Acoust. Soc. Am. **121**, 594-604.
- Clay C. S. and Medwin H., 1977: Acoustical Oceanography, Wiley, New York.
- Dragonette L. R., Vogt R. H., Flax L., and Neubauer W. G., 1974: Acoustic reflection from elastic spheres and rigid spheres and sphereroids. II. Transient analysis. J. Acoust. Soc. Am., **55**, 1130-1137.
- Ehrenberg J. E., 1979: A comparative analysis of *in situ* method for directly measuring the acoustic target strength of individual fish. IEEE J. Ocean. Eng., **OE-4**, 141-152.
- Faran Jr. J. J., 1951: Sound scattering by solid cylinders and spheres. , J. Acoust. Soc. Am. **23**, 405-418.
- Furusawa M., 1988: Prolate spheroidal models for predicting general trends of fish target strength," J. Acoust. Soc. Jpn. (E) **9**, 13-24.
- 古澤昌彦, 1990: 水産資源推定のための超音波による魚群探知に関する研究. 水工研技報, **11**, 173-249.
- 古澤昌彦, 2001: 音で海を見る, 成山堂書店, 東京.
- Foote K. G., 1980: Importance of the swimbladder in acoustic scattering by fish: a comparison of gadoid and mackerel target strength. J. Acoust. Soc. Am. **67**, 2084-2089.
- Foote K. G., 1983: Maintaining precision calibrations with optional copper spheres. J. Acoust. Soc. Am., **73**, 1054-1063.
- Foote K. G., 1987: Linearity of fisheries acoustics, with addition theorems. J. Acoust. Soc. Am., **82**, 1932-1940.
- Foote K. G., Knudsen H. P., and Vestnes G., 1987: Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: a practical guide. ICES Cooperative Research Report, No.144.
- Goodson A. D., 1997: A narrow band Bio-sonar: Investigating echolocation in the Harbour porpoise, *Phocoena phocoena*. Proceedings of the Institute of Acoustics, **19 Pt 9**, 19-28.
- Gyrin A., Rojewski, M. and Somla, K., 1981a: About the possibility of sea creature species identification on the basis of applying pattern recognition to echo signals. In: Meeting on Hydroacoustical Methods for the Estimation of Marine Fish Populations, 25-29 June, 1979, edited by J. B. Suomala. Cambridge, Massachusetts, Charles Stark Draper Laboratory Inc., Vol.2,

- Part a, 455-456.
- Gyrin, A., Somla, K. and Rojewski, M. 1981b: The number parameters of echo-sounder signals with respect to their usefulness to sea creatures species identification. In: Meeting on Hydroacoustical Methods for the Estimation of Marine Fish Populations, 25-29 June, 1979, edited by J. B. Suomala. Cambridge, Massachusetts, Charles Stark Draper Laboratory Inc., Vol.2, Part a, 467-489.
- Harley H. E., Putman E. A., and Roltblat H. L., 2003: Bottlenose dolphins perceive object features through echolocation. *Nature* **424**, 667-669.
- Hickling R., 1962: Analysis of echoes from a solid elastic sphere in water. *J. Acoust. Soc. Am.* **34**, 1582-1592.
- 本田 聡, 2004: 音響資源調査によるスケトウダラ (*Theragra chalcogramma*) 太平洋系群の若齢魚の年級豊度推定. 水研センター研報告, **12**, 25-126.
- Huang W. Y., Solorzano M. R., 1991: Wavelet preprocessing of Acoustic signals. *Conf. Rec. Asilomar. Conf. Signals, Syst. Comput.*, Vol.25, 1114-1118.
- Hsieh H. E., 1986: A split-beam target strength processor," Master degree thesis, Washington Univ., Seattle.
- 今泉智人, 古澤昌彦, 赤松友成, 2006: ハクジラのソーナー音を用いた散乱振幅の周波数特性の測定. 海洋音響学会誌, **33**, 143-150.
- 海洋音響学会, 2004: 海洋音響の基礎と応用 成山堂書店, 東京.
- 経済産業省資源エネルギー庁長官官房総務課, 2007a: 総合エネルギー統計 (平成19年版). 通商産業研究社.
- 経済産業省, 2007b: 通商白書平成19年度版. 時事画報社.
- 許 正憲, 中西俊之, 土屋利雄, 野並健二, 網谷泰孝, 新井嘉人, 1990: 海中における鉛直方向の音波の減衰について. 海洋科学技術センター試験研究報告, **R 23**, 31-41.
- Love R. H., 1971: Dorsal-Aspect Target Strength of an Individual Fish. *J. Acoust. Soc. Am.* **49**, 816-823.
- Mackenzie K.V., 1981: Nine-term equation for sound speed in the oceans. *J. Acoust. Soc. Am.*, **70**, 807-812.
- MacLennan D. N., and Simmonds E. J., 1992: Fisheries Acoustics. Chapman & Hall, New York.
- Mckelvey R. D., and Wilson D. C., 2006: Discriminant classification of fish and zooplankton backscattering at 38 and 120 kHz. *Trans. Am. Fish. Soc.*, **135**, 488-499.
- Miyanohana Y., Ishii K., and Furusawa M., 1990: Measurements and analyses of dorsal-aspect target strength of six species of fish at four frequencies. *Rapp. P.-v. Réun. Cons. Int. Explor. Mer.*, **189**, 317-324.
- 宮野鼻洋一, 1994: 魚のターゲットストレングスの特性に関する研究. 水工研技報, **15**, 83-144.
- Mukai T., and Iida K., 1996: Depth dependence of target strength of live kokanee salmon in accordance with Boyle's law. *ICES J. Mar. Sci.*, **53**, 245-248.
- Mukai T., Foote K. G., 1997: On the depth dependence of fish target strength. *ICES Council Meeting Papers*, 15.
- 村瀬弘人, 木和田広司, 2002: 鯨類調査の新技術 第10回計量魚群探知機による鯨類餌生物調査. 海洋と生物, **140**, 238-242.
- Móhl B., Wahlberg M., Madsen P. T., Heerfordt A., and Lund A., 2003: The monopulsed nature of sperm whale clicks. *J. Acoust. Soc. Am.*, **114**, 1143-1154.
- Nakahara F., Takemura A., Koido T., and Hiruda H., 1997: Target discrimination by an echolocating finless porpoise *Neophocaena phocaenoides*. *Mar. Mamm. Sci.*, **13**, 639-649.
- Nakamura K. and Akamatsu T., 1998: Comparison of echolocation signal among dolphins and porpoises. *Trans. Tech. Comm. Psychol. Physiol. Acoust. Acoust. Soc. Jpn.*, **H-98-106**.
- Nakken O. and Olesn K., 1977: Target strength measurements of fish. *Rapp. P-V. Réun. Cons. Int. Explor. Mer.*, **170**, 52-69.
- 梨本勝昭, 飯田浩二, 1994: 特集「水産資源の音響調査手法の現状と展望」について. 月刊海洋, **26**, 599-601.
- Neubauer W. G., Vogt R. H., and Dragonett L. R., 1974: Acoustic reflection from elastic spheres. I. Steady-state signals. *J. Acoust. Soc. Am.*, **55**, 1123-1129.
- 農林水産省, 2007: 図説2007年度水産白書. 農林統計

協会.

- Ohshimo S., 2004: Spatial distribution and biomass of pelagic fish in the East China Sea in summer, based on acoustic surveys from 1997 to 2001. *Fish. Sci.* **70**, 389-400.
- 大村秀雄著, 1974: クジラの生態 共立出版, 東京.
- Ona E. (Editor), 1999: Methodology for target strength measurements (with special reference to *in situ* techniques for fish and mikro-nekton). ICES Cooperative Research Report No. **235**.
- Pauly T., Nicol S., Higginbottom I., Hosie G., and Kitchener J., 2000: Distribution and abundance of Antarctic krill (*Euphausia superba*) off East Antarctica (80-150°E) during the Austral summer of 1995/1996. *Deep-Sea Res. II*, **47**, 2465-2488.
- Reeder D. B., Jech J. M., Stanton T. K., 2004: Broadband acoustic backscatter and high-resolution morphology of fish: Measurement and modeling. *J. Acoust. Soc. Am.*, **116**, 747-761.
- Reid D. G. (Editor), 2000: Report on echo trace classification. ICES Cooperative Research Report No. **238**.
- Rudgers A. J., 1969: Acoustic pulses scattered by a rigid sphere immersed in a fluid. *J. Acoust. Soc. Am.*, **45**, 900-910.
- 実吉純一, 菊池喜充, 熊本乙彦監修, 1968: 超音波技術便覧. 日刊工業新聞社, 東京.
- 澤田浩一, 高尾芳三, 高橋秀行, 安倍幸樹, 奥村都誉司, 小林朝子, 杉森守宏, 2004: 水産調査のための音響・光学複合システム (J-QUEST) の開発 I — 音響システムの開発 —. *水工研技報*, **26**, 23-33.
- Sawada K., Ye Z., Kieser R., McFarlane G., Miyanoohana Y., and Furusawa M., 1999: Target strength measurements and modeling of Walleye Pollock and Pacific hake. *Fish. Sci.*, **65**, 430-435.
- 貞安一廣, 安倍幸樹, 澤田浩一, 高尾芳三, 向井 徹, 飯田浩二, 2005: 遊泳による魚体の屈曲運動がターゲットストレングスに与える影響. *海洋音響学会誌*, Vol. **32**, 30-39.
- Simmonds E. J., Williamson N. J., Gerlotto F., and Aglen A., 1992: Acoustic survey design and analysis procedure: a comprehensive review of current practice. ICES Cooperative Research Report No. **187**.
- Simmonds E. J., Armstrong F., and Copland P. J., 1996: Species identification using wideband backscatter with neural network and discriminant analysis. *ICES J. Mar. Sci.*, **53**, 189-195.
- Space and Naval Warfare Systems Center, 1998: Annotated Bibliography of Publications from the U. S. Navy's Marine Mammal Program. U. S. Navy Marine Mammal Program, Revision D.
- Stanton T. K., Chu D., Wiebe P. H., Martin L. V., and Eastwood R. L., 1998: Sound scattering by several zooplankton groups. I: Experimental determination of dominant scattering mechanisms. *J. Acoust. Soc. Am.*, **103**, 225-235.
- 社団法人海洋水産システム協会, 2003: 平成14年度水産業持続的生産・流通技術開発事業 魚種識別計量魚群探知機開発報告書. 社団法人海洋水産システム協会, 東京.
- 高尾芳三, 1994: スケトウダラの音響資源調査. *月刊海洋*, **26**, 660-665.
- 吉田昭仁, 久郷信俊, 佐藤圭司, 黒田真生, 石田憲治, 2002: 気泡群の終端速度に関する研究. *マリンエンジニアリング学術講演会論文集*, Vol. **68**, 153-156.
- Zakharia M. E., Magand F., Hetroit F., and Noël Diner, 1996: Wideband sounder for fish species identification at sea. *ICES J. Mar. Sci.*, **53**, 203-208.

魚類の聴性誘発反応に関する基礎的研究^{*1}

須賀 友大^{*2}

Basic study for fish auditory brainstem response

Tomohiro SUGA

Abstract : The Auditory brainstem response (ABR) method is an alternative method to measure the fish auditory threshold. The ABR method allows quick and repeatable measurement of fish without invasive surgery. In this work we developed a method to measure audiograms of fishes.

To date, there is no method available to determine the effect of water displacement on method to measure fish hearing, because the measurement of displacement is quite difficult in an auditory experiment. A well-known method to eliminate water displacement when measuring fish audiograms is to face two loudspeakers towards each other and then place a fish between the speakers. This study describes another method to eliminate water displacement. This method measured audiogram in air. Audiogram of marbled sole *Pleuronectes yokohamae* obtained in air was higher than those obtained in water. This difference was presumably due to inner ear or lateral line sensitivity to water displacement around the center of the water tank.

Next we demonstrated that some of the ABR components of fishes are derived from peripheral organs such as the saccule, lagena and utricle in the inner ear. In this experiment, we used sound stimuli of different durations to demonstrate that the ABR of goldfishes *Carassius auratus* was contaminated with microphonic potential. The durations of the ABR were in proportion with the durations of the sound stimuli.

Next the ABR of fishes is commonly measured by bringing the heads of the fishes out of the water in a small tank, however this method is inapplicable to experiments for large fishes that are economically important in large space such as the sea or in a large tank. This study describes a method to record the ABR for fishes in water without exposing the fish heads in air using a water proof and insulated electrode. To evaluate the effectiveness of this method, the goldfish was investigated, and the ABR waveform and auditory thresholds measured in water were compared with these measured on the surface. Both ABR waveforms and auditory thresholds showed similar trend between the two methods. The “underwater ABR method” is considered to be useful to measure the larger fish auditory threshold in a natural or on site environment as in the sea, net enclosures and large aquaria in which precise positioning of the fish is not possible, though more improvement is needed to apply this method to large fishes.

Next we used ABR method to measure audiograms for juvenile Japanese sand lance to determine if they are capable of sensing the sound produced by fishing vessels. And we investigated the sensitivity to ultrasound of spot-lined sardine by ABR method to know the

2008年12月22日受理 (Received on December 22, 2008)

^{*1} 北海道大学審査学位論文 (投稿に際し投稿規定に沿って一部修正した)

^{*2} 水産工学研究所 〒314-0408 茨城県神栖市波崎7620-7 (National Research Institute of Fisheries Engineering Fisheries Research Agency, 7620-7, Hasaki, Kamisu, Ibaraki 314-0408, Japan)

possibility whether this fish escape when fish respond to the ultrasound that created by fisheries sonar. Japanese sand lance responded to low frequency sounds between 128 Hz and 512 Hz with sound pressure level of 115 to 125 dB. As the test frequency decreased, so did the auditory threshold level, and the level was about 116 dB at 128 Hz and 181 Hz. These results indicate that Japanese sand lance can detect low frequency sound but are less sensitive than other fish species. The ABR amplitude of spot-lined sardine to ultrasound (40 kHz, 60 kHz, 80 kHz, and 100 kHz) were approximately $0.125 \mu\text{V} \sim 0.75 \mu\text{V}$. These ABR amplitudes to ultrasound stimuli were quite smaller than those of species capable of detecting ultrasound. Spot-lined sardine are not sensitive to ultrasound presentation of 40 kHz, 60 kHz, 80 kHz, and 100 kHz at sound pressure levels from 180 dB to 190 dB.

This experiment indicate that spot-lined sardine can not detect bio-sonar of porpoise and fishing echo-sounders at distance more than 100 to 300 m from sound source in spherical spreading where the sound pressure level drops less than 180 dB $\sim$ 190 dB.

Keywords : fish, auditory threshold, hearing, ABR

緒 言

聴覚は魚類等の水棲動物にとっては重要な感覚である。音は水中では減衰が少なく方向の探知も可能であることから水棲動物の餌の探索や捕食者の接近の感知等に有効に使われていると考えられる。

魚類の音の感覚器には内耳と魚体の体側にある側線器がある。また鰾も聴覚に有効な器官の1つである。魚類の内耳も人間のように頭部に存在するが、耳介、外耳、中耳は存在せず、内耳のみが存在する(川村、安楽、1998)。内耳は聴覚と平衡機能に関与することが知られている。内耳迷路は前庭(通囊、小囊、壺囊)と三半規管から構成され、前庭には炭酸カルシウムでできた耳石が存在する。小囊にある耳石は最も大きく、解剖しても肉眼でよく観察することができる。音により頭部が揺らされると密度の高い耳石は取り残され、その周りにある有毛細胞との相対的位置が変わる。そして有毛細胞が曲げられて傾くことにより、受容細胞が刺激される。音により直接的に頭部が揺らされて内耳にある有毛細胞を刺激する場合と、鰾を介して間接的に内耳にある有毛細胞を刺激する場合とがある。

キンギョ *Carassius auratus* では聴覚器官について比較的詳しく研究されており、聴覚神経である小囊の第8神経には直径 $15 \mu\text{m}$ 位の太い線維(S1線維)と $5 \mu\text{m}$ 位の細い線維(S2線維)とが別々の束で存在することが解明されている。太い方のS1線維は極性の異なる2つの有毛細胞に接続していて音の圧縮期と減圧期の両方に反応することができるため音刺激の2倍の周波数で活動電位が起こることが知られている(古河、1977)。硬骨魚類の半円堤(TS)は大きく発

達した視蓋に覆われるため表面からは見えず、中脳室に取り込まれた状態になっている。一般の魚種では半円堤は機能的に内側と外側に分けられ、内耳神経によって受容された音刺激と側線神経によって受容された機械的刺激に対応している(伊藤、吉本、1991)。

魚類の聴覚はマウスナー細胞と呼ばれる逃避行動を駆動するニューロンと直接結合していることも知られている(小田、2004; デルコミン、1999)。この細胞は聴神経が刺激されると刺激された側と反対の胴筋を一斉に収縮させ、瞬時の逃避運動を引き起こすことで知られる。マウスナー細胞には側線や視覚からの刺激も入力されるが、側線からの入力逃避行動を引き起こすほどではなく、視覚からの入力は遅い逃避行動しか引き起こさない(小田、2004)。このため魚類の聴覚と逃避行動とは密接な関係がある。小型魚類の捕食者となる大型の魚類は数100~数1,000 Hzの遊泳音や摂餌音を発することが知られている(竹村、1984; 間庭、1984)。イルカ類はエコーロケーションで20~150 kHz程度の超音波を使って魚類を捕食することが知られている(Au, 1993)。シャチ *Orcinus orca* は魚群を尾鰭で叩いて捕食行動を行うことが知られているが、このときも大きな超音波が生じることが報告されている(Malene *et al.*, 2005)。また漁船の推進機関からは数100 Hzの低周波雑音が発せられており(Hatakeyama *et al.*, 1997)、調査船などでも使われる魚群探知器では数10~数100 kHzの超音波が使われている(高尾、1994; 和田、1994)。このような環境下では魚が捕食者や漁船と遭遇し、これらが発する周波数の音を聴いた時、すぐに逃避行動を起こす(小田、2004)か、もしくは音を学習して逃避行動を起

こすようになる可能性 (Popper, 1972a; Popper, 1972b) が考えられる。魚類の逃避行動についてはスキニングソナーを用いて船舶の接近に対する魚群の逃避行動が計測されている (李ら, 2000)。また船から発せられる 1 kHz 以下の低周波騒音が魚の行動に影響を与えるのではないかという指摘もなされ、船からの騒音を減らす試みもされている (Yoshimura and Koyanagi, 2004)。

さらに海上空港、橋脚などの大型土木建設工事にともなう魚類への影響評価や石油掘削、海底資源探査にともなう大音圧放射の魚類への影響評価など、海洋開発を行う上で魚類聴覚の計測は欠かせない (Hatakeyama *et al.*, 1997)。トンネル発破作業が及ぼす漁業への影響も検討されてきている (Hatakeyama *et al.*, 1997)。特に水産有用魚種が陸上あるいは海上における土木工事によって発せられる騒音によって受ける生理、生態面における影響についても、今後明らかにされるべきであろう。

一方、養殖業や作り育てる漁業の一環として、稚魚期の段階で水中音の放音と給餌を同時に与えることで条件付けを行い、後に成魚になってから音の放音だけで魚を集める音響馴致システムの構築も試みられている (Anraku *et al.*, 1997)。

1982年に締結された国連海洋法条約により沿岸漁場の重要性が高まり、より効率的な漁場利用と資源管理が必要となっている。漁業形態も獲る漁業からつくり育てる漁業へと資源管理型漁業の推進に向けて政策の転換が図られている。そして様々な魚種の種苗生産及び放流が行われるようになってきている。このような資源管理型漁業の一環として音響馴致養殖がある。音を使って魚の摂餌行動を制御し魚を一定範囲に集めて餌を与えることで広範囲に餌を散布する必要がなくなるため集約的かつ効率的な給餌が可能となり、労働コストの削減も可能となるなどの経営面でのメリットがあげられる。また稚魚から成魚まで天然の自然海域で育てることができるために大型の施設を設置する必要がないことと水中で減衰が少なく遠方まで届く音の物理的特性によって数百 m 離れた魚の行動制御も期待できる。

このような音響馴致養殖を水産有用魚種へ適用する計画がなされ、これまでマダイ *Pagrus major* やヒラメ *Paralichthys olivaceus* で成果が上がりつつあることが報告されている (Anraku *et al.*, 1997, 1998; 渡辺ら, 1990; 安沢ら, 1995)。

音響馴致に用いる音源を選別することや魚類が漁船騒音等を感知しているかを知るためには対象となっている魚種の聴覚特性を示す聴覚閾値曲線を調べ、

特に感受性の鋭敏な周波数範囲を知る必要がある。Kenyon ら (Kenyon *et al.*, 1998) は骨鰈類であるキンギョ *Carassius auratus* の聴覚閾値曲線を求め、100 ~ 5,000 Hz の範囲で最も聴覚閾値の低い周波数は 400 ~ 1,000 Hz であり、閾値は約 64 dB であると報告している。非骨鰈魚に関しては Chapman and Hawkins (1973) がタラ *Gadus morhua* の聴覚閾値曲線を 30 ~ 470 Hz の範囲で求め、60 ~ 380 Hz に閾値の低い領域を持つ曲線を示し、閾値は 74 ~ 82 dB の範囲にあるとしている。無鰈魚では Chapman and Sand (1974) がツノガレイ *Pleuronectes platessa* とマコガレイ属の *Limanda limanda* で 30 ~ 200 Hz の範囲で聴覚閾値曲線を求め、110 Hz で閾値が最も低くなり、90.6 dB となっている。

聴覚閾値曲線の計測方法には心電図導出による刺激時の心拍間隔の伸長を指標とした方法 (以下、心電図法と呼ぶ) と魚体頭部に電極を取り付け聴性誘発反応を記録する方法 (以下、聴性誘発反応法と呼ぶ) の 2 つが主に使われている。

Chapman and Hawkins (1973) はタラ *Gadus morhua* の聴覚閾値を心電図法を用いて計測し、鰈が聴覚の補助器官として重要な役割を果たしていることを指摘している。Chapman (1973) はタラ科魚類 (Haddock *Melanogrammus aeglefinus*, Pollack *Pollachius pollachius*, Ling *Molva molva*) の聴覚閾値曲線を心電図法で計測し、聴覚閾値が海中の雑音によって 20 ~ 30 dB 上昇することを明らかにしている。また、タイセイヨウタラ *Gadus morhua* の超音波に対する感受性が心電図法を用いて実験され、一定の距離でソナーを感知できることが指摘されている (Astrup and Møhl, 1993)。

国内でも魚類の聴覚計測には心電図法が多く用いられている。Sawa (1976) はキンギョ *Carassius auratus*, Ishioka ら (1988) はマダイ *Pagrus major*, Kojima ら (1992) はサクラマス *Onchorhynchus masou*, Park ら (1995) はスケトウダラ *Theragra chalcogramma*, Motomatsu ら (1996) はクロソイ *Sebastes schlegeli*, Yamakawa (1998) はニジマス *Onchorhynchus mikiss*, Zhang ら (1998) はマコガレイ *Pleuronectes yokohamae* の聴覚閾値曲線を求めている。

魚類の聴性誘発反応法は近年使われ始めた比較的新しい方法で、ヒトでは既に研究成果が臨床に応用されている (Jewett *et al.*, 1970; 加我君, 1998; 船坂, 2000; 加我君, 1987~1988)。魚類の聴性誘発反応は Corwin (1981) によってエイ科のソーンバックギターフィッシュ *Platyrrhinoidis triseriata* の聴性誘

発反応が研究され、それ以降の研究は心電図法と比べると少なかったが、近年、増えつつある。Kenyon ら (1998) は聴性誘発反応法と心電図法等で求めた聴覚閾値曲線とを比較して聴性誘発反応法が心電図法と比べて手術の影響が少ないことや短時間で計測できる等の長所を示している。Enger and Mann (2005) は珊瑚礁に生息するオヤビツチャ属のサージアントメジャー *Abudefduf saxatilis* の幼魚が自らの生息場所である珊瑚礁を探すときに珊瑚礁から生じている音を頼りに方向を定めているのではないかと推測し、珊瑚礁海域の音響特性と聴覚閾値曲線との比較から 1 km 以内の距離では珊瑚礁の方向探知に役立っているとしている。Lovell ら (2005, 2006) は音圧調節をすることでイリノイ川に生息する上着の魚種 (ヘラチョウザメ *Polyodon spathula*, カワリチョウザメ *Acipenser fulvescens*) は侵入させ、土着でない魚種 (ヌメリゴイ科のハクレン *Hypophthalmichthys molitrix*, コクレン *Aristichthys nobilis*) を侵入させないように排除するための音響フェンスを設置するために各魚種が感知可能な周波数と閾値を求めている。Akamatsu ら (2003) はマイワシ *Sardinops melanostictus* の聴覚閾値曲線を求めて漁船のエンジン音が聴こえているか調べている。また、鰐が聴覚閾値を低くする効果が有ることを証明している。

聴覚閾値曲線を求めるための心電図法では刺激音の放音方法として対向した 1 組のスピーカの中央に供試魚を置いた装置が用いられている。また供試魚は水槽内の水中に置かれることになり、水粒子変位の影響がおよぶ近距離効果の範囲で行われているにも関わらず、音圧についてのみ測定されている。このため水中音圧計では計測されない近距離効果による水粒子変位に対する感受性によって、本来音圧に対する感受性として測定されたはずの閾値が影響を受けた可能性も考えられる。そこで本研究では魚体を水中に固定した場合と空中に固定した場合の 2 つの方法で計測し、近距離効果の影響について検証した。

また、近距離効果を排除するためには自然の海や大型の水槽で実験を行うことも有効な手段である。心電図法では計測例 (Chapman and Hawkins, 1973; Chapman and Sand, 1974; Chapman, 1973) があるが、聴性誘発反応法を用いて海や大型水槽で計測する実験は国内でも国外でも未だ行われていない。海や大型水槽で聴性誘発反応法を使って魚類の聴覚を計測する方法を確立させ、大型魚等の多くの魚種を扱えるように適用範囲を広げることも必要である。

本研究では第 1 章でマコガレイ *Pleuronectes yokohamae* を用いて近距離効果の影響を除外するた

めに空中に魚を固定し、心電図を利用した古典的条件付け法で聴覚閾値曲線を求め、近距離効果の影響が含まれていると考えられる水中に魚を固定した実験結果と比較して実験方法の妥当性を検証した。第 2 章では聴覚特性について詳しく研究されているキンギョを用いて聴性誘発反応の発生する部位について検証した。第 3 章では聴性誘発反応の計測を電極部まで水没させて行い、この計測法を発展させる可能性について検討した。第 4 章では水産有用魚種への応用例として、これまで計測が困難であった小型魚のイカナゴ *Ammodytes personatus* について聴性誘発反応法により聴覚特性を調べた。また浮魚のマイワシ *Sardinops melanostictus* の超音波に対する応答の計測も試みた。総合考察では聴性誘発反応法と心電図法の比較と本研究で使用した魚種の聴覚性能について考察し、聴性誘発反応法の有用性について検討した。

第 1 章 スピーカ対向法の近距離効果の分離

音圧成分は遠方まで減衰せずに届く性質をもつことから音響馴致に利用する場合、対象となる魚類の音圧成分に関する閾値を知ることが重要になる。魚類の聴覚閾値の計測は主に実験室内の小型の水槽に魚を保定して行う方法が用いられてきている。この方法では水槽内部に発生する音源に起因する水粒子変位 (Harris, 1964; Parvulescu, 1966) (近距離効果) も同時に魚に刺激として与えられており、音圧成分 (遠距離効果) のみを刺激源とした計測をすることが困難であることが指摘されている (阿部, 1976)。したがって従来とは違う計測法を用いることが必要となる。

近距離効果を除去するためによく使われている方法はスピーカを対向させて音を同位相同振幅で放音し、魚を保定している水槽の中心で水粒子変位を相殺させることで抑制する方法 (以下、スピーカ対向法) である (阿部, 1976)。しかし、これまで行われてきた研究では、水粒子変位量の測定が可能な装置が使えなかったことから、音源と供試魚間の距離が近距離効果の範囲であるにも関わらず、水中音圧計により供試魚の位置における音圧のみが計測されてきた。したがって、供試魚が感知している可能性がある水粒子変位の影響がどの程度、計測値に含まれているかが不明のままであった。特にカレイのような異体類は音圧ではなく水粒子変位に対してより鋭い感受性をもつ魚といわれている (Hawkins and MacIennan, 1975) ため、スピーカ対向方法で音圧を指標として計測されたマコガレイ *Pleuronectes yokohamae* の聴覚閾値曲線 (Zhang et al., 1998) には、水粒子変位に反応した計測値が含

まれている可能性がある。そこで本研究では水中と空中では水粒子変位と空気粒子変位との違いはあるが圧力波の性質はどちらの媒質でも同じであることに着目した。そして従来方法である供試魚を水中に置くのではなく、魚体全体を空中に暴露した状態で固定することで水粒子変位を抑制し、音の圧力波のみが供試魚に与えられる条件で聴覚閾値曲線を求める実験を行うことにした。この方法と従来方法とを比較するため供試魚にはマコガレイを用い、閾値の計測には心電図法を使用し、聴覚閾値曲線の違いから本実験方法の有効性について検討した。

1-1 供試魚

実験には平均全長23 cmのマコガレイ10尾を使用した。供試魚の全長、体重を Table 1-1に、マコガレイの写真を Fig. 1-1に示す。供試魚は北海道函館市近郊の札幌町と知内町から入手し、FRP水槽（190 cm × 100 cm × 45 cm）で飼育した。

マコガレイは、日本沿岸域の北は石狩湾、南は東シナ海まで分布し、中でも北海道道南地域では年間を通して漁獲され、非常に美味で市場価値が高い。このためマコガレイについても音響馴致養殖への適用の可能性が検討されている。

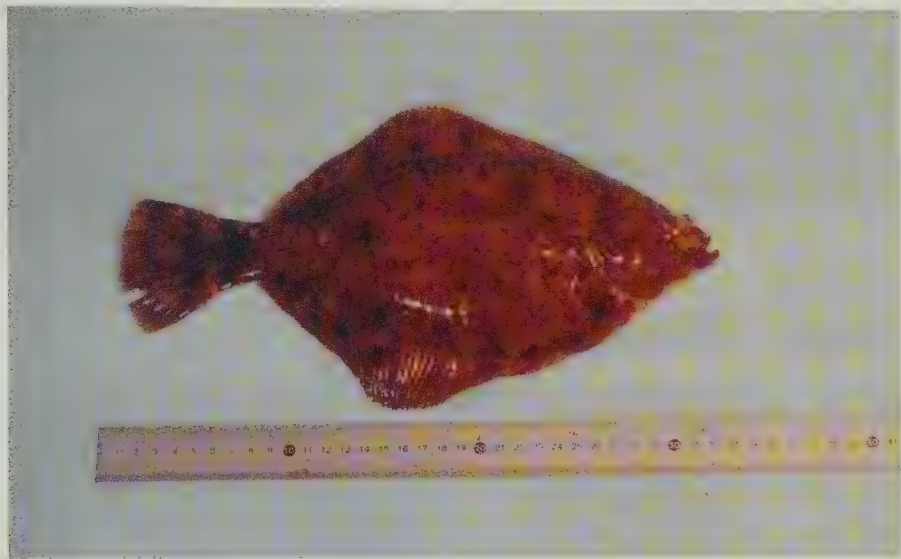


Fig. 1-1. marbled sole *Pleuronectes yokohamae*.

Table 1-1. Total length and body weight of fish

No.	TL (cm)	BW (g)
A1	25.4	324
A2	25.8	381
A3	19.1	165
A4	19.3	125
A5	23.8	289
A6	23.8	319
A7	21.4	259
A8	24.1	313
A9	25.3	268
A10	26.8	381
Mean	23.5	282.8
SD	2.7	83.5

1-2 実験装置および方法

実験装置の概略を Fig. 1-2 に、写真を Fig. 1-3 に示す。供試魚を固定する固定台と相対する 1 組のスピーカを厚さ 2 cm の発泡スチロールでできた防音箱の中に入れ実験室内の雑音を排除した。固定台の底面四隅には振動を低減させるための防振ゴムを敷いた。防音箱の内側には吸音材として厚さ 2.5 cm のグラスウールを貼り付け、外側の全面にアルミ箔を貼って接地しハムノイズの混入を防いだ。刺激音は空中スピーカで放声し、2 つのスピーカの中央に供試魚を置き、音源の延長線上に魚の内耳が位置するようにした。

電極を装着した供試魚は L 型アングルで組んだ固定台の上の金網に置き、メッシュサイズ約 1.5 mm のナイロンメッシュを被せてから直径約 1.0 mm のナイロンモノフィラメントを使って縫うように固定し、口から鰓へ呼吸確保のための灌流を行った。灌流水用に上部に置いたタンクには閾値測定時以外はエアレーションをして酸素を十分に供給した。下の排水タンクに溜まった海水は小型ポンプで上の灌流タンクへ揚水した。

空中に固定した供試魚の呼吸確保に必要とされる灌流量は灌流タンク内の溶存酸素量とマコガレイの一般

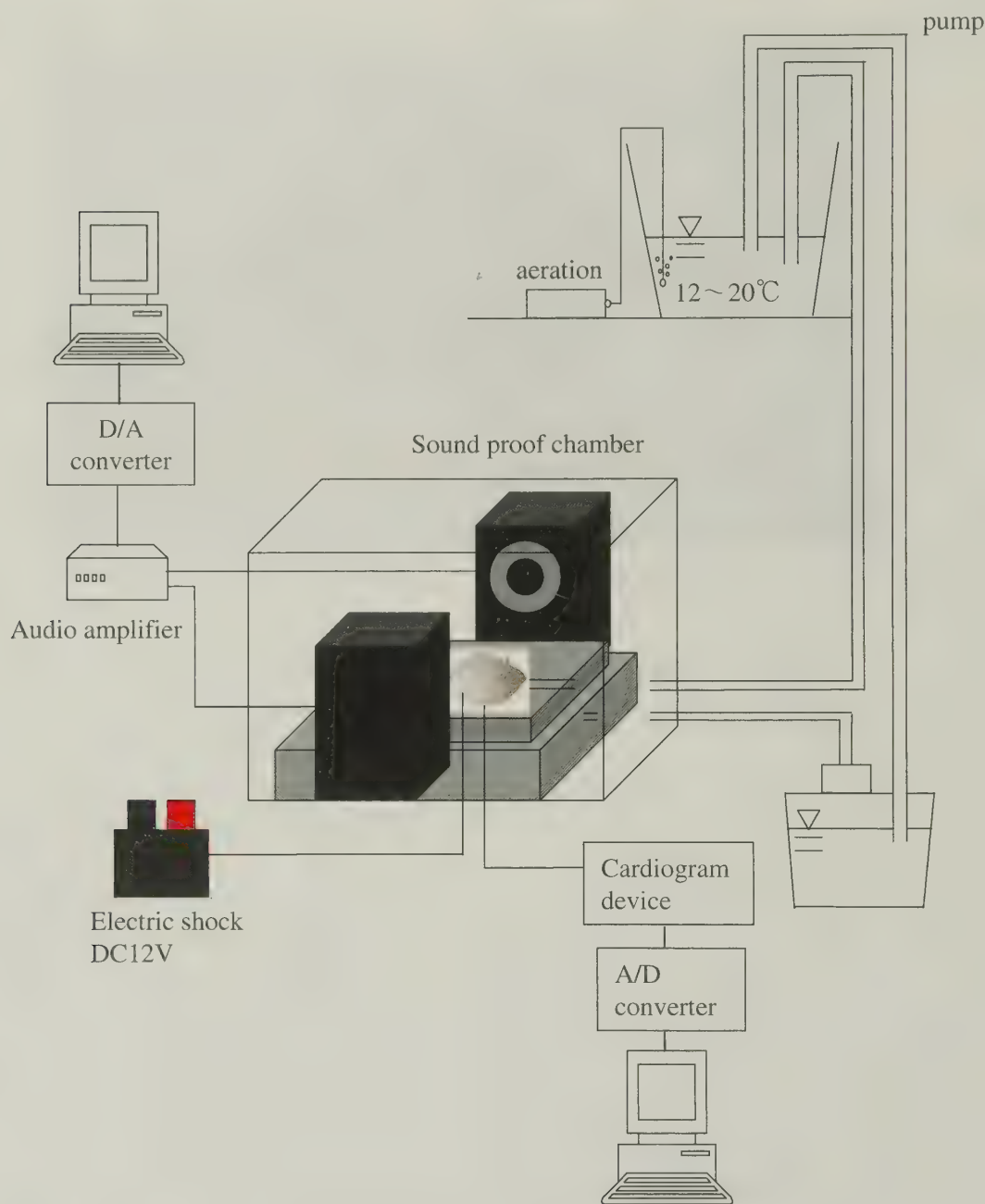


Fig. 1-2. Equipment used for determining the auditory threshold of marbled sole.

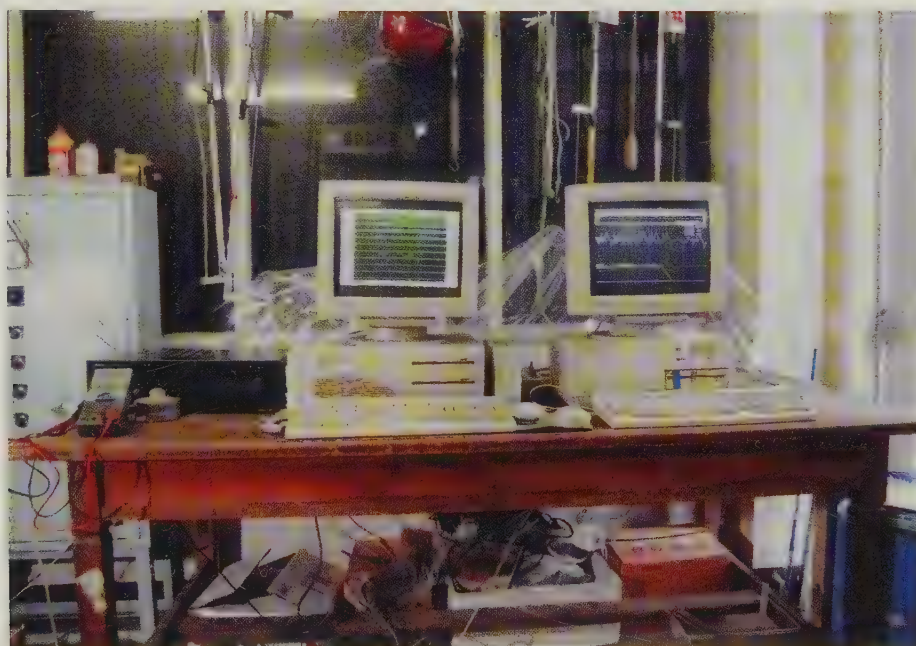


Fig. 1-3. Photograph of equipment used for determining the auditory threshold of marbled sole.

的な酸素消費量（板沢, 1970; 板沢, 1991）から計算でき, 100 g の体重で 1 秒間に 0.43 ml 必要であることがわかった。本実験における流量は約 2.28 ml/s であり, 実験魚の体重は最大でも 400 g 以下で, 十分な流量であった。灌流タンク内の溶存酸素量は DO メーター（TOX-90/TOX90i, 東興化学研究所）で計測した。灌流水の水温は 14.7 °C ~ 20.1 °C であった。

刺激音はアンプで増幅してスピーカより放音した。供試魚に装着した電極を心電計（FX1201, フクダ電子）と A/D 変換器内蔵パソコン（NEC, PC-9801）に接続し, 心電位を計測した。A/D 変換のサンプリング周波数は 100 Hz とした。刺激音はパルスの最初と最後の 0.2 秒間を緩やかに立ち上がり, 立ち下がるように処理した 2 秒間の単一音（シングルバースト）を使用した（Fig. 1-4）。刺激音には 63 Hz, 100 Hz, 160 Hz, 200 Hz, 315 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 630 Hz, 1,000 Hz の周波数音を使用した。パソコンへの刺激音の波形の取り込みはサンプリング周波数 10 kHz で 1.63 秒間（16,384 点）の音を A/D 変換して行った。刺激音の音圧は 1/3 オクターブ FFT により得られた周波数成分より求めた。

心電図導出 実験では飼育水槽から取り出した供試魚を 0.02 % フェノキシエタノール（関沢, 1981）で薬浴麻酔した後, 心電図導出用の電極を心臓付近へ挿入した。電極には一般に市販されている直径 0.8 mm の

10 芯コード線を用い, 先端から 3 cm の位置でビニール被膜を 3 mm 程剥いて導出部とした。直径 1.7 mm, 長さ 70 mm の注射針を麻酔した供試魚の無眼側胸鰭基部から腹鰭前縁へ向かって刺し込み, 無眼と有眼の境目からやや有眼よりの場所に貫通させた。次に針先から電極を挿入して注射針を抜き取り, 電極の露出部をあらかじめ位置を確認しておいた心臓付近になるようにした。心電図導出用の電極と電極挿入に使用した注射針の写真を Fig. 1-5 に手術状況の写真を Fig. 1-6 に示す。

条件付け 空气中に固定した供試魚は電極装着手術から回復し, 心拍数が安定するまでに約 10 時間を要した。心拍数が安定してから音と電気ショックによる条件付けを行った。条件付けの放音音圧は 100 ~ 1,000 Hz では約 135 ~ 145 dB, 63 Hz に関しては 153.1 dB とした。放音の直後に無条件刺激として電気ショックを供試魚の尾部に与えて放音時に心拍間隔の伸長が生じるようにした。この条件付けの試行を 5 ~ 15 分の間隔で条件付け完了まで約 10 回繰り返した。さらに 30 分後に放音直後の心拍間隔が明らかに伸長することを 2 回確認して条件付けの完了と判断した。Fig. 1-7 に条件付けの完成後の放音時に心拍間隔が伸長した例を示す。

聴覚閾値測定 供試魚が放音を感知したか否かの判定は, 放音前の 30 拍の間隔と放音時の間隔について Mann Whitney の U 検定を行い, 音刺激の供与によ

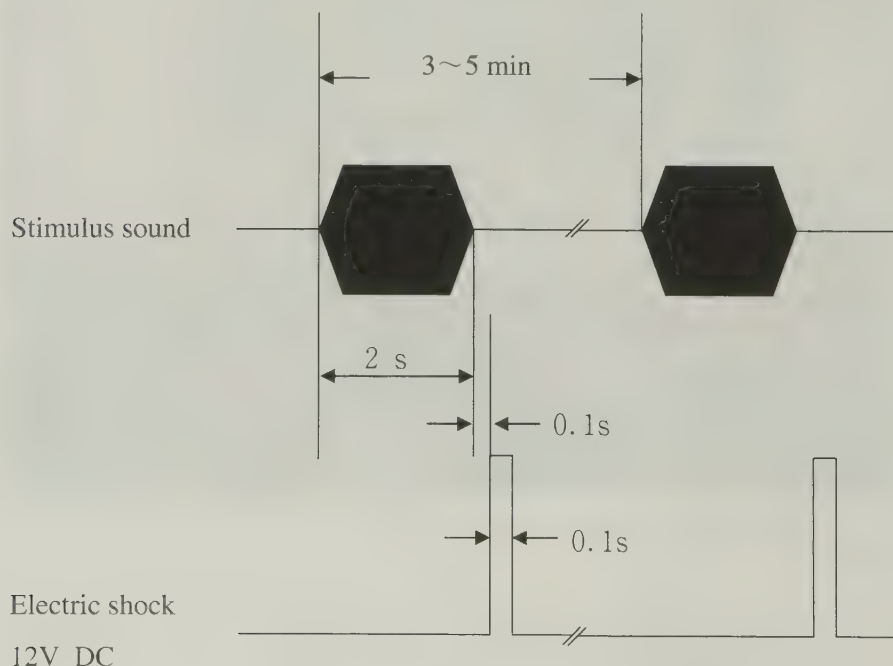


Fig. 1-4. Conditioning method. Upper trace shows the sound stimuli from the air speaker, Lower trace shows the 0.1s 12V-DC electric shock applied 0.1s after the end of the sound stimulus.

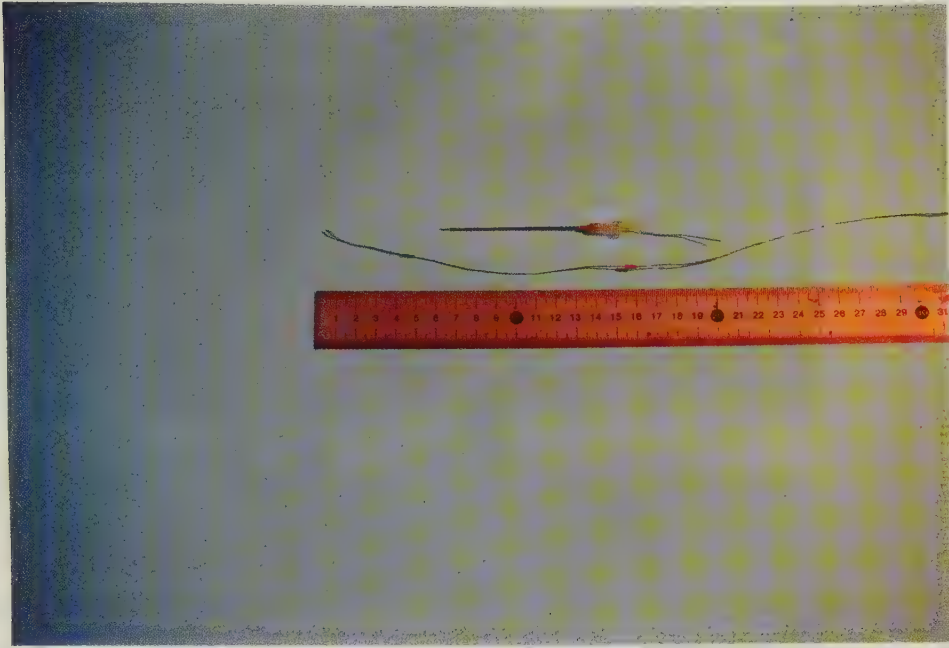


Fig. 1-5. Electrode for recording cardiac potentials.

り心拍間隔が有意に伸びた（有意水準 5 %, 片側検定）ことを指標とした。聴覚閾値の測定は反応がみられない音圧の 75 ~ 80 dB から始め、上記の指標により反応有りとな認められるまで音圧を上げ、反応が見られた場合は音圧を下げることを 3 dB ステップで行い、音圧を階段状に変化させ、なおかつ同一音圧で 2 回反応有りとな判定された場合、この音圧を聴覚閾値とした（Fig. 1-8）。

本実験では魚体は水中ではなく空中に露出しているため、空中から放音した音は魚体内に入射するときに媒質の異なる空気から水（魚体の密度は水とほぼ等しい）へと音が入射するため音圧が減衰する可能性がある（Urlick, 1972）。そこで魚の位置での音圧計測を魚体の頭部付近へ小型ハイドロホン（B&K8103, Bruel and Kjaer）を埋め込んで行った。また魚体内へ音が入射したときの音圧の減衰量を求めるため、魚体に小型ハイドロホンを埋め込んだ計測とは別に、魚の固定位置での魚体外部での音圧計測も空中騒音計（NL-05, Rion）を使用して行った。魚体内部での音圧計測には

全長 22.2 cm の死亡した 1 個体を使用した。空中音圧は水中音圧とは異なり基準音圧が dB re 20 μ Pa であるため 26 dB を加えることで基準音圧が dB re 1 μ Pa である水中音圧へと換算した。

Fig. 1-9 にマコガレイの魚体内に小型ハイドロホンを埋め込んだ部位の模式図と写真を示す。小型ハイドロホンはメスを使って魚の頭部を切開して挿入した後、魚肉の圧力で自然と固定された。小型ハイドロホンの出力はアンプ（B&K2635, Bruel and Kjaer）で増幅し、パソコンに取り込んで解析に用いた。アンプのアースは実験室の外に接地した。アンプの電源は電氣的ノイズの混入を防ぐため、交流電源は使わずにバッテリーによる直流電源を使用した。

また、実験室内の背景雑音は魚を固定したときの内耳の位置に空中騒音計（NL-05, Rion）を置いて、20 : 25 ~ 07 : 29 の間に 1 時間ごとに計測し、空中騒音計からの出力をサンプリング周波数 10 kHz で A/D 変換し、1.63 秒間のデータをコンピュータへ取り込み、平均した後 1/3 オクターブ分析を行った。

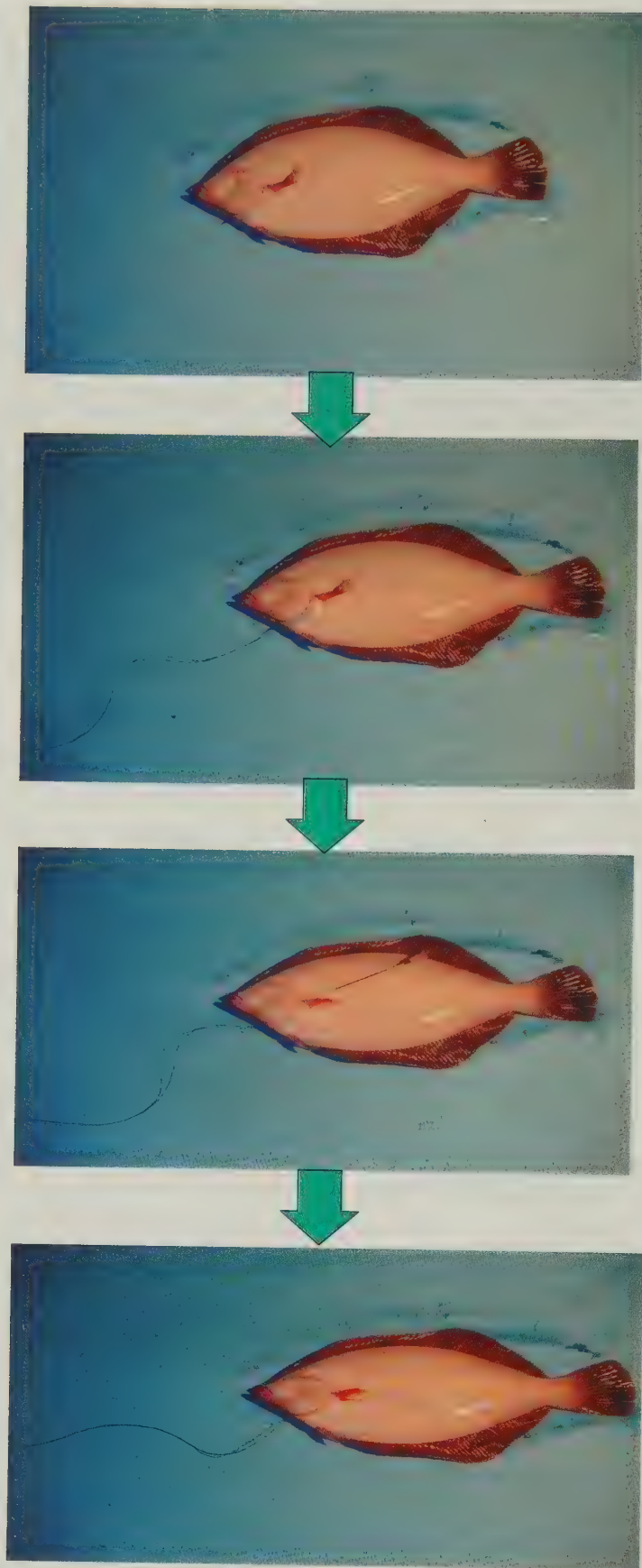


Fig. 1-6. Operation to record electrocardiogram.

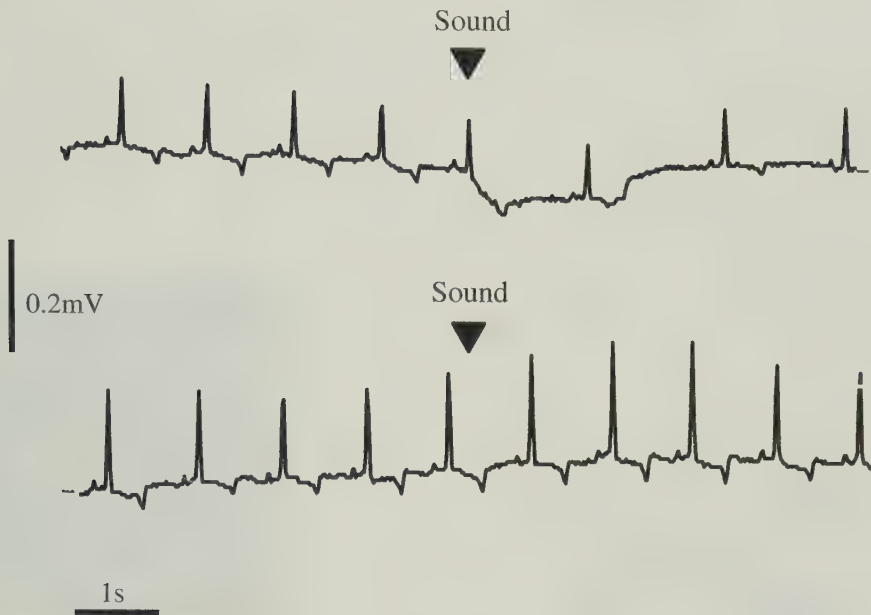


Fig. 1-7. Electrocardiogram of tested fish to sound stimulus. Upper trace shows a positive response. Lower trace shows a negative response.

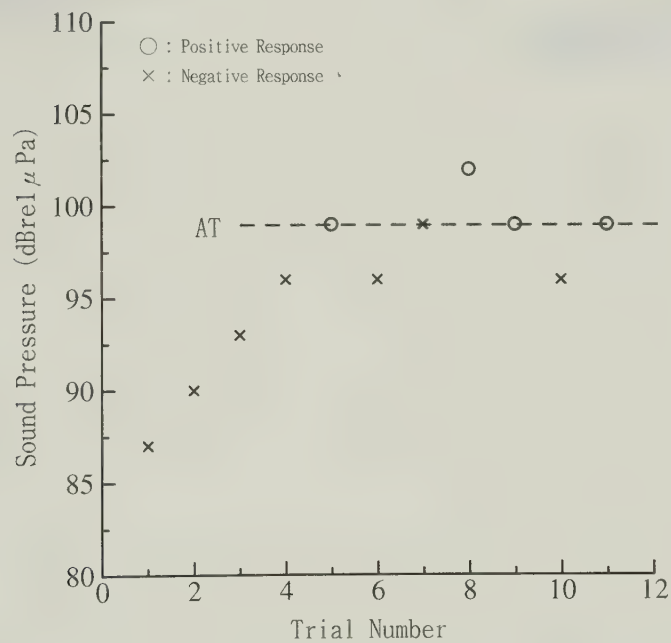


Fig. 1-8. Determination of auditory thresholds. Broken line shows the auditory threshold (AT).

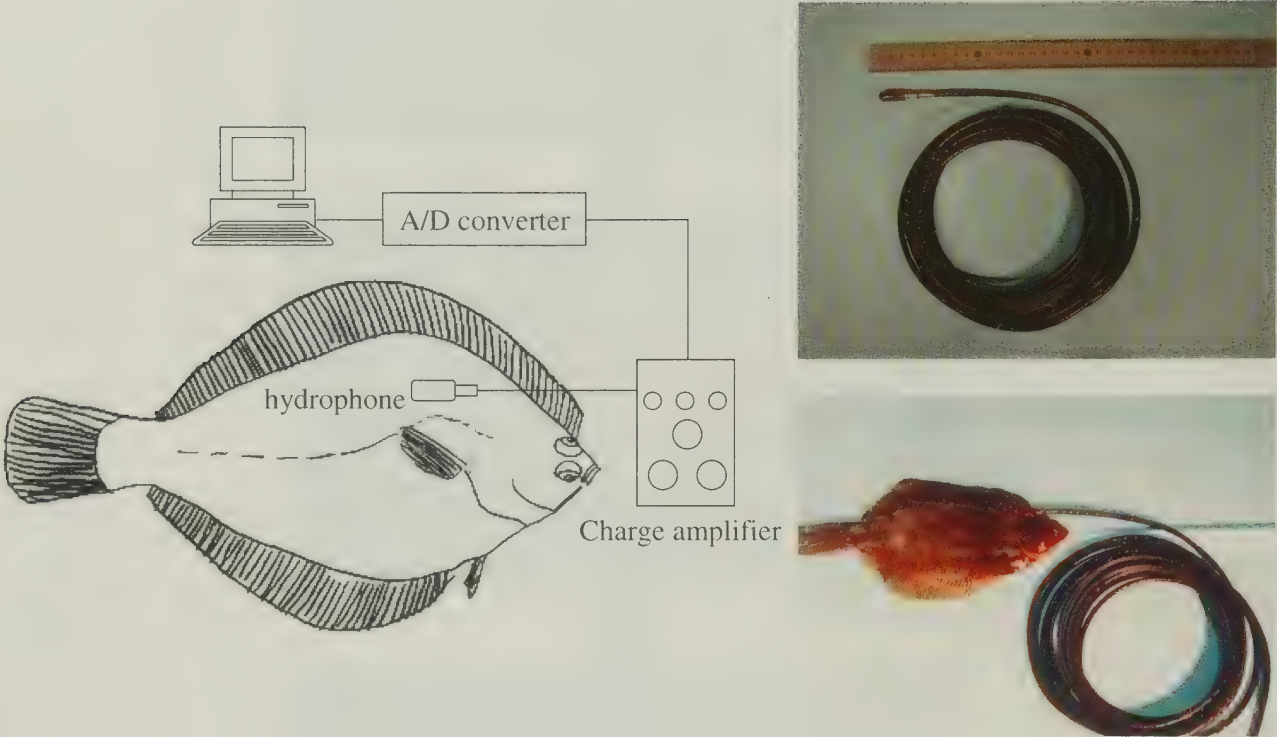


Fig. 1-9. Block diagram of equipment used for calibration the sound pressure of signal inside the fish bodies.

1-3 実験結果

魚体の内部に小型マイクを挿入して計測した音圧と魚体の外部で空中騒音計を使って計測した音について、100 Hz の波形と振幅を比較した図を Fig. 1-10 に示す。魚体内部で計測した音は波形の乱れはあるが魚体外部で計測した音と比較し、音圧が著しく減衰していることはなかった。Fig. 1-11には100 Hz と160 Hz の刺激音を80 dB から150 dB まで3 dB ステップで放音した時の魚体内部と外部の音圧を比較した図を示す。周波数63 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 315 Hz, 400 Hz, 500 Hz では魚体内部と外部とでほとんど同じ音圧を示したが、160 Hz, 630 Hz, 1,000 Hz ではやや音圧差が大きくなり、160 Hz で最大約7.7 dB の差が見られた。したがって聴覚閾値の値は魚体内部の音圧を用いた。

各個体の聴覚閾値と平均の聴覚閾値を Table 1-2

に、聴覚閾値曲線を Fig. 1-12に示す。聴覚閾値は160 Hz で最も小さく、平均で106.7 dB となった。160 Hz 以下の低い周波数では本実験で求めた聴覚閾値は上昇し、63 Hz の聴覚閾値は平均で131.1 dB であった。160 Hz 以上の高い周波数では閾値は緩やかに増加し、630 Hz での聴覚閾値は平均で143.5 dB となった。水中に魚を固定し、空中スピーカ対向方法で計測している Zhang の聴覚閾値 (Zhang *et al.*, 1998) と本研究で得られた聴覚閾値とを Mann Whitney の U 検定 (有意水準 5 %, 片側検定) を用いて比較すると、100 Hz, 200 Hz, 500 Hz, 1000 Hz で、本研究で得られた聴覚閾値の方が有意に高い結果となった。400 Hz に関しては有意な差は見られなかった。他の周波数は Zhang の使用した周波数と一致していなかったため比較は行わなかった。

本実験の実験室の背景雑音は63 Hz で68.6 dB が最

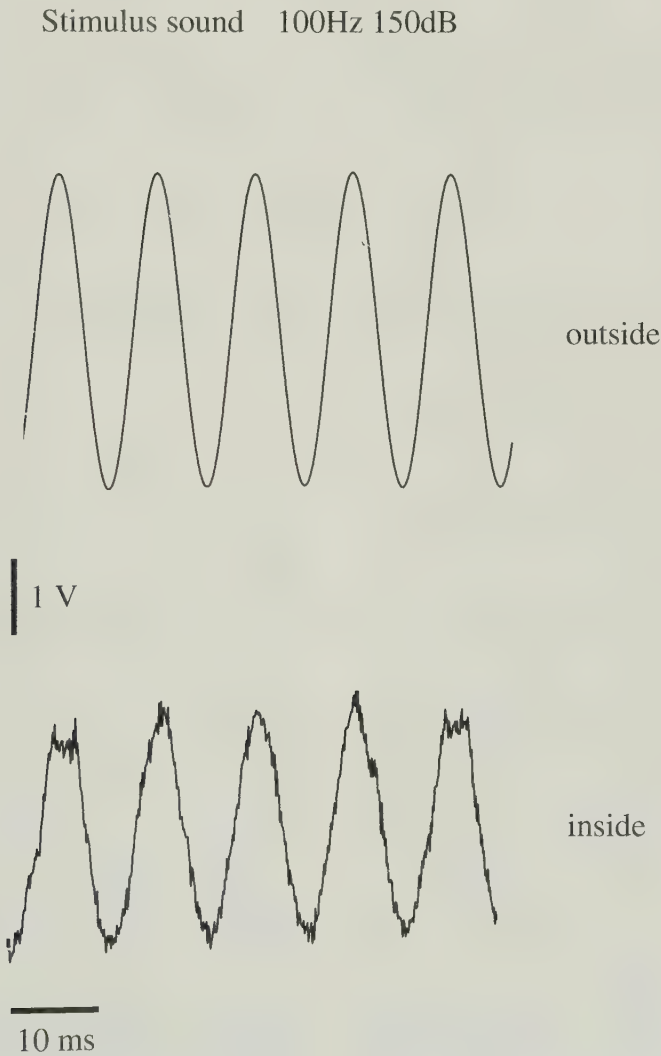


Fig. 1-10. Comparison of 100Hz waveforms recorded inside and outside the bodies of marbled sole.

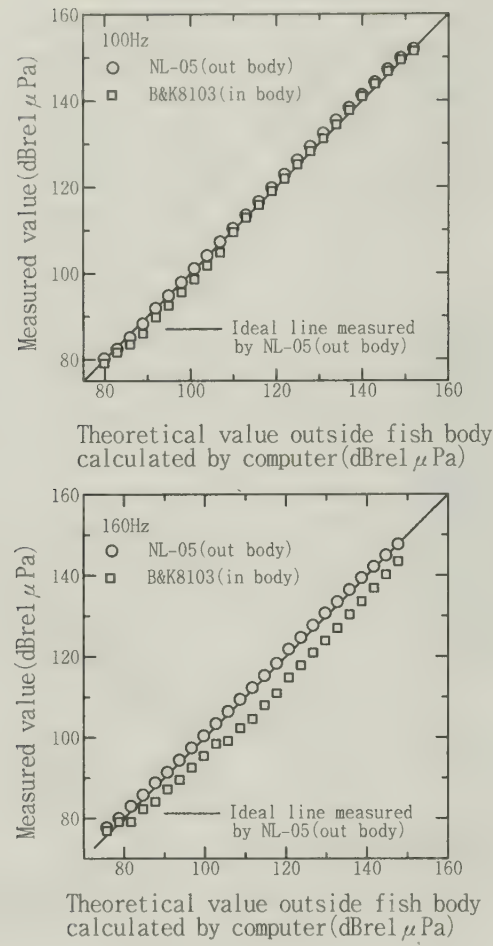


Fig. 1-11. Comparison of sound pressure inside and outside the bodies of marbled sole.

Table 1-2. Auditory threshold of ten marbled sole

No	Frequency (Hz)								
	63	100	160	200	315	400	500	630	1000
A1	148.7	140.7	104.5	136.4	—	—	—	—	140.4
A2	151.6	140.7	107.1	108.3	115.8	122.0	120.8	143.5	140.4
A3	98.8	113.0	111.4	131.1	125.0	—	—	—	—
A4	—	—	—	—	—	125.0	—	—	140.4
A5	123.8	103.9	104.5	120.5	124.6	115.6	123.6	140.5	140.4
A6	—	140.7	—	127.2	115.8	—	—	—	—
A7	—	103.9	107.1	—	—	122.0	—	—	—
A8	109.8	—	96.0	111.4	128.2	—	—	—	—
A9	136.2	119.8	—	117.4	—	—	—	—	—
A10	107.5	103.9	104.5	114.3	118.8	109.6	130.3	—	—
Mean	140.4	132.5	105.8	125.6	122.6	120.3	125.7	142.0	140.4

(Unit : dB re 1 μ Pa)

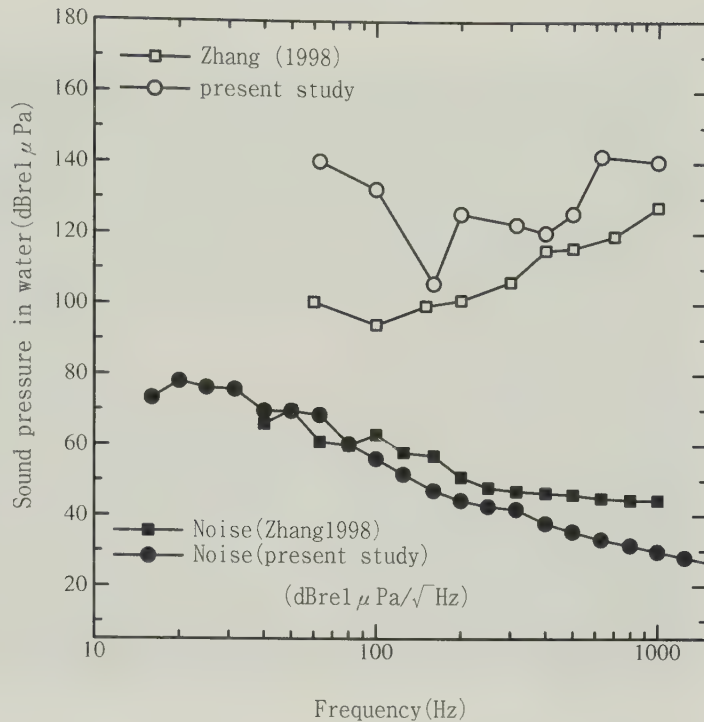


Fig. 1-12. Comparison of audiograms measured using two speakers facing each other to eliminate displacement (Zhang, 1998) and using sound stimulation in air (present study).

大となり、これ以上の周波数では緩やかに減少していた。

1-4 考察

本研究で求めたマコガレイの聴覚閾値曲線は Fig. 1-12に示すように小型水槽を使って水中に供試魚を固定して空中でスピーカを対向させて求められた Zhang の聴覚閾値曲線 (Zhang *et al.*, 1998) よりも高くなった。灌流により呼吸は確保しているものの魚体が空気に触れているため水中で生活している魚にとって影響があったとも考えられる。また、スピーカ対向方法によって同位相同振幅で放音したときの水粒子変位を計測した結果、中心は抑制されるが、中心の周り 10 cm の範囲内で水粒子変位が著しく、水粒子運動が生じているという報告⁶¹⁾もある。したがって水中に魚を固定して求められている Zhang *et al.* (1998) の実験結果には完全には抑制されない水粒子変位 (近距離効果) にマコガレイが反応した結果、音圧だけに対する感受性よりも閾値が低くなったと考えられる。

スピーカ対向方法で使われたマコガレイと本実験で使ったマコガレイは別の時期に漁獲された個体群であるが、供試魚はスピーカ対向方法と本実験で全長、水

温、実験場所、生息海域はほぼ同じであり、個体群間で聴覚閾値に差がある可能性は少ないことから閾値曲線の形状の違いについて考える。

魚類の聴覚器官である内耳と側線のうち、側線器官の感覚毛やクブラは音の波長より十分細く、パスカルの原理により四方から同じ力が作用するため、圧力波によって揺動することはないとされている (下澤, 加納, 1987)。さらに感覚毛の長さは境界層の厚さの 1.8~6.7 倍のとき最大の感度を示し (Shimozawa and Kanou, 1984), 水中の動物の感覚毛は水の境界層に対応しているため、境界層の厚さが水中の 4 倍ある空気中では感度が低下することも知られている (下澤, 加納, 1987)。したがって本章の実験では音圧成分を側線ではなく内耳で受容していたと考えられる。本研究と Zhang *et al.* (1998) の実験を比較すると、160 Hz 以上は 2 つの曲線ともほぼ同じ傾向で増加しているが、160 Hz 以下では内耳のみの受容による本研究の結果は閾値が高くなり、Zhang *et al.* (1998) の実験結果には側線による受容が含まれていることから閾値が低くなっていると考えられる。さらに 160 Hz 以下では近距離効果の影響が著しく、Zhang *et al.* (1998) の実験では内耳と側線の両方の器官で近距離

効果を感じたため閾値が低くなったことも考えられる

本実験の結果から判断すると従来の水中に魚体を固定してスピーカを対向させた実験方法では水粒子変位が完全には抑制されず、近距離音場での実験になっていたと考えられる。また本研究で用いた実験方法の妥当性を検証するためには実海域のような遠距離音場が確実な場所で実験を行い、本実験の結果と比較する必要がある。

第2章 空中電極固定法と反応発生部位

1章では水中に供試魚を固定してスピーカを対向させる方法における近距離効果（水粒子変位）の影響が明らかになった。供試魚を空中に固定することで近距離効果を排除することが可能であることがわかったが、本来、魚は水中で生棲しているため実験は水中で行うことが自然である。そこで2章以下の章では供試魚は水中に固定し、なるべく刺激周波数の波長より小さい水槽を使うことで、水槽全体を圧縮膨張させ圧力刺激のみを与えるようにして近距離効果の影響を排除し（Parvulescu, 1966）実験を行った。

聴覚閾値の測定には第1章で示した心電図法が主に用いられてきた。この方法は条件付けに時間がかかり、同一個体の測定回数が限られる欠点がある。この点を改善する方法として近年聴性誘発反応を測定する方法（聴性誘発反応法）が用いられるようになってきている。聴性誘発反応法は小型の実験水槽に魚を入れ、頭部表皮を水面から軽く露出させ、マニピュレータを使って電極を確実に頭部表皮へ固定させて行う方法（空中電極固定法と名付ける）である。ヒトの聴性誘発反応と同様に外科的手術が不要で、反応電位は電極を頭部表皮に置くことで得られる。聴性誘発反応は個別の神経からの反応電位ではなく、中枢で生じている反応を間接的に導出している。ヒトの反応とは異なり音刺激に対応して反応波形が変化し、一定のパターンが見られないのに加え、10 ms以上の比較的持続時間の長い音刺激でも明瞭な反応が得られる特徴を有する（Mann *et al.*, 2001; Wysocki and Ladich, 2003）。

内耳を始めとする半円堤などの聴覚器官に直接、微小電極を挿入して得られる電位は一般に刺激音の2倍周波数が含まれることが知られている（安楽, 1998）。例えばキンギョでは内耳の小囊斑から得られるマイクロホン電位に音刺激周波数の2倍周波数成分を持つこと、内耳の小囊神経に電極を挿入して得られる following response にも音刺激と同一か2倍周波数成分を持つことが知られている（古河, 1977）。ハゼ

*Dormitator latifrons*でも壺囊や通囊から音刺激周波数の2倍周波数成分を持った反応が計測できることが知られている（Lu *et al.*, 2003; Lu *et al.*, 2004）。さらにコイの脳を露出させて半円堤からの聴覚応答を記録した例では音刺激周波数の2倍周波数成分をもった反応が記録されている（安楽, 1998）。またニシン科魚類では周波数600 Hz、持続時間20 msの音に対し、刺激音の2倍の周波数成分を持つ聴性誘発反応が得られている（Mann *et al.*, 2001）。このように聴音時に中枢神経から直接得られる電位に見られる周波数成分の特徴が間接的に頭部から得られる電位にも見られることも確かめられて来ている。したがって魚類の聴性誘発反応は内耳の小囊、通囊、壺囊のような低次の処理器官で発生した反応が頭骨を通じて測定されている可能性がある。

キンギョの内耳の小囊から得られるマイクロホン電位や following response は刺激音の持続時間が長くなれば、それに応じて反応も長くなる特徴がある。そこで本章ではキンギョの聴性誘発反応を記録し、刺激音の持続時間に対する誘発電位の反応持続時間や2倍周波数成分の有無などの反応波形の特徴を明らかにし、これまで中枢神経から直接得られているマイクロホン電位等の反応波形と比較し、魚類の聴性誘発反応の発生部位について調べた。

2-1 供試魚

実験には尾叉長が4.4～7.4 cmのキンギョ *Carassius auratus* 5尾を使った。供試魚の写真をFig. 2-1に、尾叉長、体重をTable 2-1に示す。キンギョは聴覚閾値の低い魚であり、多くの研究者によって聴覚閾値曲線が求められている。

2-2 実験装置および方法

実験装置の概略をFig. 2-2に示す。実験水槽（34.0×20.0×24.5 cm）は実験室の床からの振動を防ぐために空気テーブルの上に設置した。また周辺環境からの騒音を除去するために防音室に入れた。供試魚は頭部を除いてネオプレーンゴムで包み、包んだゴムをプラスチックのクリップで留め、クランプを使って挟みこむように固定した。聴性誘発反応を導出するための電極にはテフロンでコーティングされた直径約0.1 mmのタングステンを使った。電極をFig. 2-3に示す。電極の一方（関電極）は中脳中心部に相当する頭部表皮からやや内部へ0.5 mm挿入し、もう一方（不関電極）は中心部へ挿入した電極の約5 mm前方へ同様に挿入した（Fig. 2-4）。聴性誘発反応は生体電気アンプ（MEG1200, 日本光電）で増幅し、500 ms間



Fig. 2-1. Goldfish *Carassius auratus*.

Table 2-1. Total length and body weight of fish

No.	TL (cm)	BW (g)
B1	6.3	7.0
B2	6.0	6.9
B3	4.4	3.8
B4	5.4	5.5
B5	7.4	12.5
Mean	5.9	7.1
SD	1.1	3.3

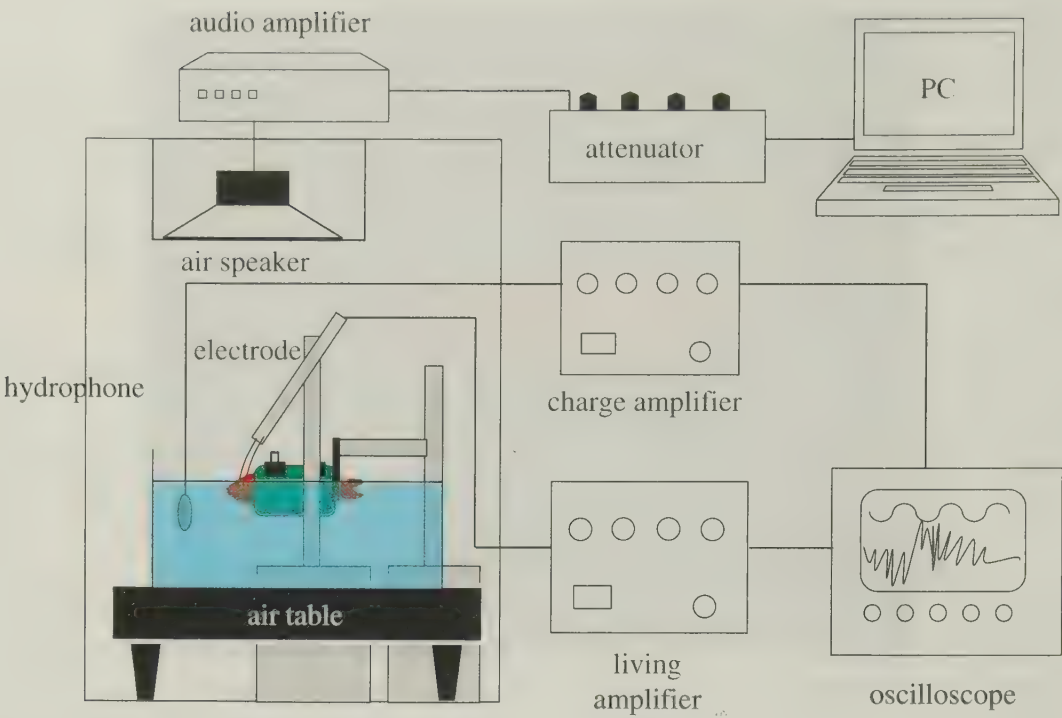


Fig. 2-2. Schematic diagram of the ABR normal recording setup.

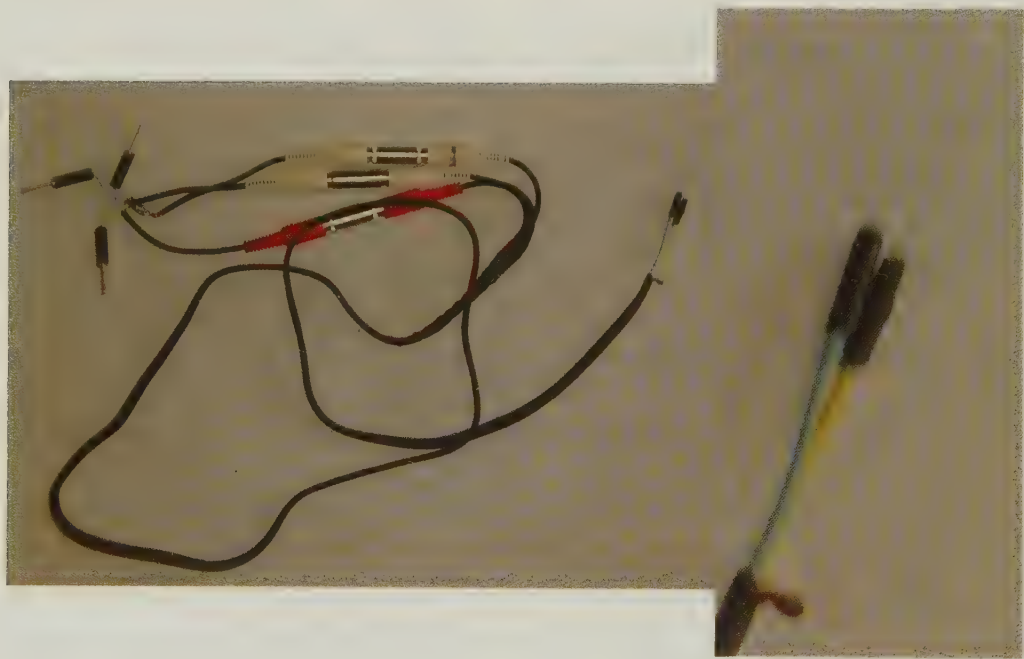


Fig. 2-3. Electrode to record ABR.

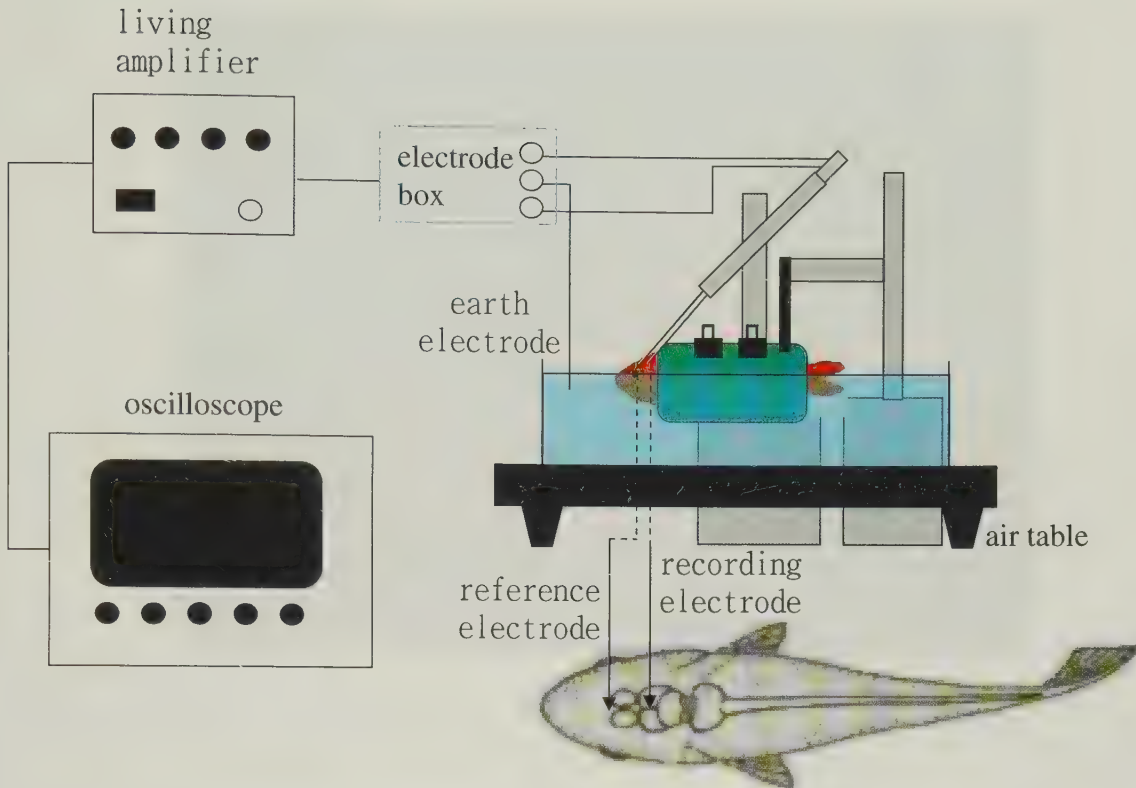


Fig. 2-4. Schematic diagram of the ABR normal recording setup. Dorsal view (citation oda 2004).

隔で放音される同じ音刺激に対する反応を300回加算平均してオシロスコープ (LC334M, LeCroy) に記録した。生体電気アンプに接続する電極箱のアースは水槽内へ入れた。実験に使用したマニピュレータ、オシロスコープを Fig. 2-5 に示す。

刺激音の放音方法を Fig. 2-6 に示す。用いた刺激音は周波数 1 kHz、音圧 120 dB のトーンバースト音（立上がり立下がり 2 波）で、音波形を編集して出力することのできるアプリケーションソフトウェア (Cool Edit 2000, フリーソフト) を使って作成し、オーディオアンプ (AC 3, PIONEER) を使って増幅し、刺激波形の反応波形に対する影響を取り除くために放音毎に位相を 180° 反転させ、空中スピーカから断続的に放音した。刺激音の持続時間は 1 ms, 5 ms, 10 ms, 20 ms に変化させた。

供試魚の位置での刺激音の音圧はハイドロホン (B&K8103, Bruel & Kjaer) を使って計測した。ハイドロホンで拾った音刺激の音波形はチャージ増幅器 (B&K2635, Bruel & Kjaer) で増幅し、オシロスコープ (LC334M, LeCroy) に記録し、その振幅から音圧を求めた。音圧校正の状況を Fig. 2-7 に示す。

聴性誘発反応波形の周波数特性の解析は FFT によ

り行った。刺激音の持続時間と聴性誘発反応の持続時間との関係は各刺激音の持続時間に対して得られた反応の持続時間の全ての計測値（5 個体の各個体で 1 ms, 5 ms, 10 ms, 20 ms の音それぞれに対し 2 回ずつ計測した反応波形）を使用し、回帰直線 (石居, 1975) を求めて検討した。

実験装置に聴性誘発反応以外の信号が含まれていないかを確かめるために死亡個体に関しても刺激音を放音して聴性誘発反応を計測したが電位反応は見られなかった。

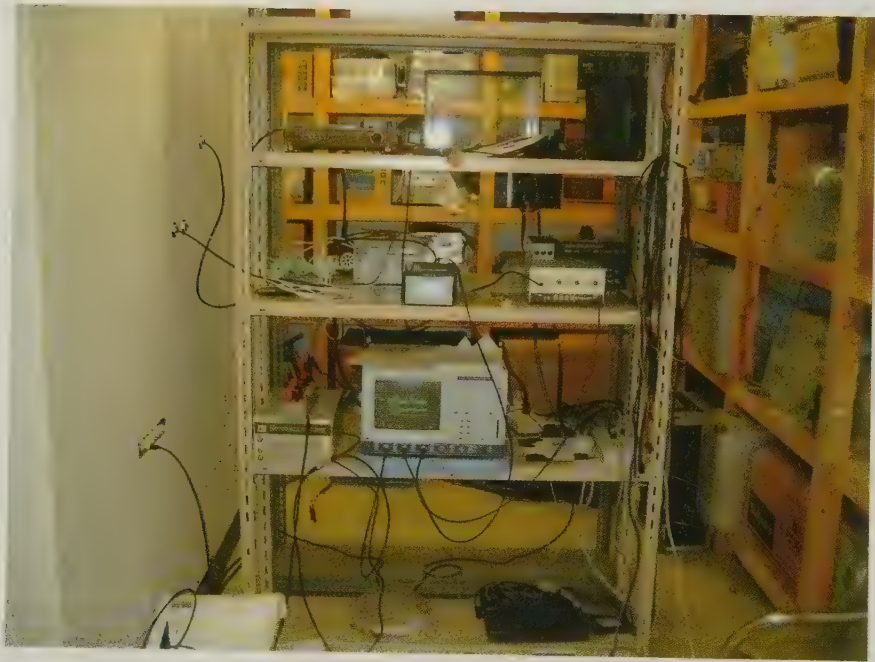
2-3 実験結果

1 ms, 5 ms, 10 ms, 20 ms の各持続時間の刺激に対して 5 個体全てから 2 回ずつ反応波形を記録することができた。Fig. 2-8 に供試個体 B1 の波形の一例を示す。また Table 2-2 に各持続時間の音刺激に対する反応持続時間および平均値と標準偏差を示す。計測できた聴性誘発反応の振幅は peak to peak で約 5 μ V 以下であった。

Fig. 2-9 に各刺激音の持続時間とそれに対応した反応持続時間の関係を示す。(Fig. 2-9) 相関係数は $R=0.97$ となり、有意な正の相関関係 ($\alpha = 0.05$, t 検定,



manipulator



oscilloscope, living amplifier, audio amplifier, attenuator

Fig. 2-5. Device for normal ABR method

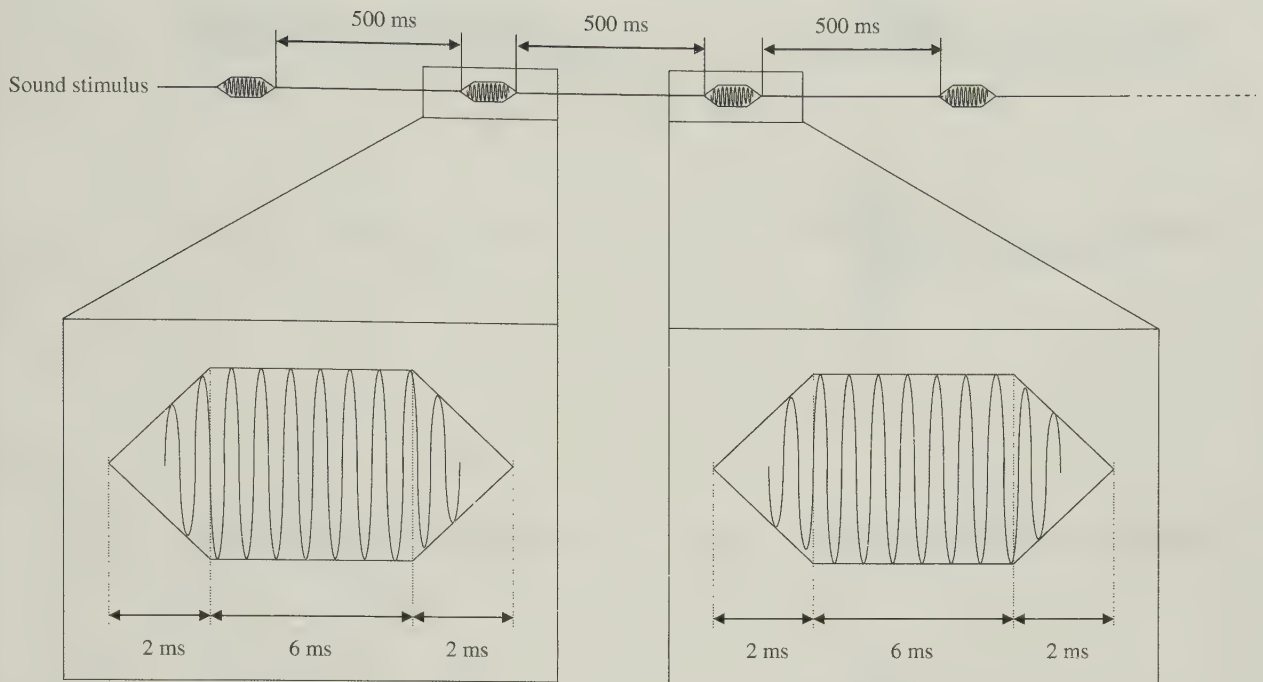


Fig. 2-6. Method to play sound stimulus (example of 10ms toneburst)

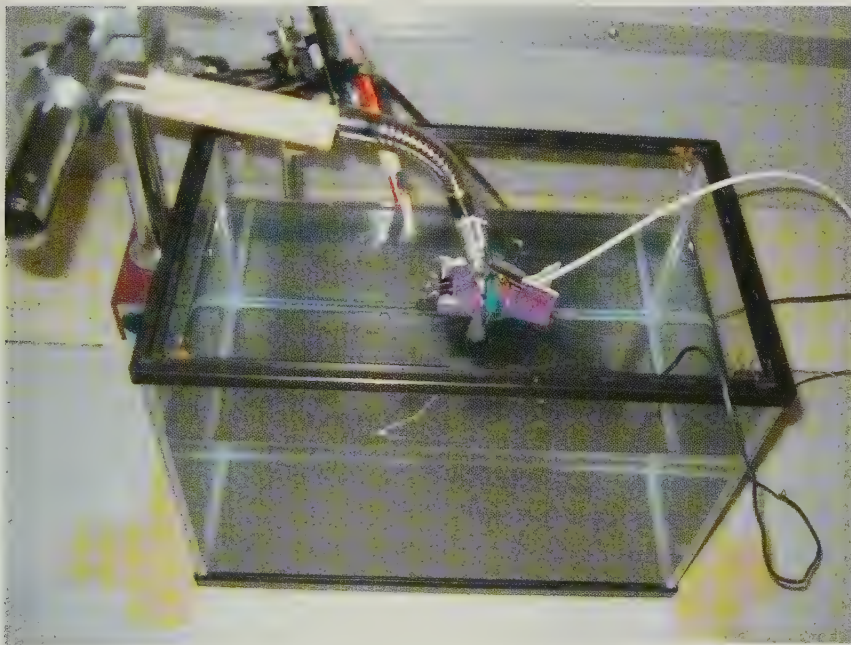


Fig. 2-7. Calibration of sound stimulus.

Table 2-2. ABR duration to each stimulus duration

No.	ABR duration (ms)			
	Stimulus duration (ms)			
	1	5	10	20
B1	4.44	6.44	12.28	21.52
	4.48	6.44	12.12	21.60
B2	3.60	11.16	20.56	24.96
	3.48	11.12	20.80	25.40
B3	5.20	6.84	11.76	21.68
	5.20	6.92	11.88	21.68
B4	3.92	7.70	11.67	21.93
	3.74	7.34	11.85	21.92
B5	5.37	6.33	10.30	20.10
	5.16	5.82	10.13	20.10
Mean	4.46	7.61	13.34	22.09
SD	0.74	1.93	3.94	1.77

片側)があった。聴性誘発反応の持続時間は刺激音の持続時間に対応して長くなることがわかった。

20 ms の音刺激への反応波形は刺激音周波数の約2倍の周波数である2 kHz 周辺の成分が卓越していた。これに対して、持続時間の最も短い1 ms の時の反応は2倍周波数成分が小さくなり、卓越成分はほとんど見られなくなった。

キンギョの聴性誘発反応は通常は先行研究(Kenyon *et al.*, 1998)でも示されているように反応開始から基線が負の方向へ移動し、続いて正の方向へ移動して元の位置に戻るといった特徴がある。本章で計測した反応波形は1 ms ~20 ms のどの反応波形でも最初の立ち上がり方が正の方向へ移動した。本章では供試魚頭部に挿入した電極の関極と不関極の固定位置が反対になったため基線が最初に正に移動したと思われる。1 ms への反応では波形が振動しながら正から負へ移るのに対し、5 ms 以上の音に対する反応では反応開始から約5 ms までは1 ms の時と同様の波形であるが、約5 ms 以降は波形の基線が移動し、反応波形全体が低周波数の振動をしているように見える。これに関しては交流ノイズの50 Hz に起因する振動が混入してきている可能性も考えられるが確かめることはできなかった。

2-4 考察

本実験では Fig. 2-8, Fig. 2-9に示したように刺激音の持続時間が長くなると、反応持続時間が長くなる傾向が見られた。これらをキンギョのマイクロホン電位(古河, 1977)や frequency following response(古河, 1977), ハゼ *Dormitator latifrons* の内耳や通囊から得られる反応(Lu *et al.*, 2003; Lu *et al.*, 2004)など、中枢神経から直接導出される電位波形と比較すると、いずれの反応波形も刺激音の2倍周波数成分を持つこと、音の持続時間に対応した反応が得られること(1 ms に対する反応は除く)、刺激音の持続時間が長くなるにつれて聴性誘発反応の反応持続時間も長くなること、反応波形が正弦波であること等、多くの点で共通する傾向が見られた。1 kHz の刺激音については1 ms の持続時間には、波数が1つであるためエネルギーが小さく、2倍周波数成分が出にくかったものと考えられる。

これらのことからキンギョの頭部表皮に電極を軽く挿入して計測する聴性誘発反応は一定の持続時間以上であれば内耳の小囊、通囊や壺囊等の器官に由来して発生した反応電位が間接的に頭部表皮から記録されていると考えられる。

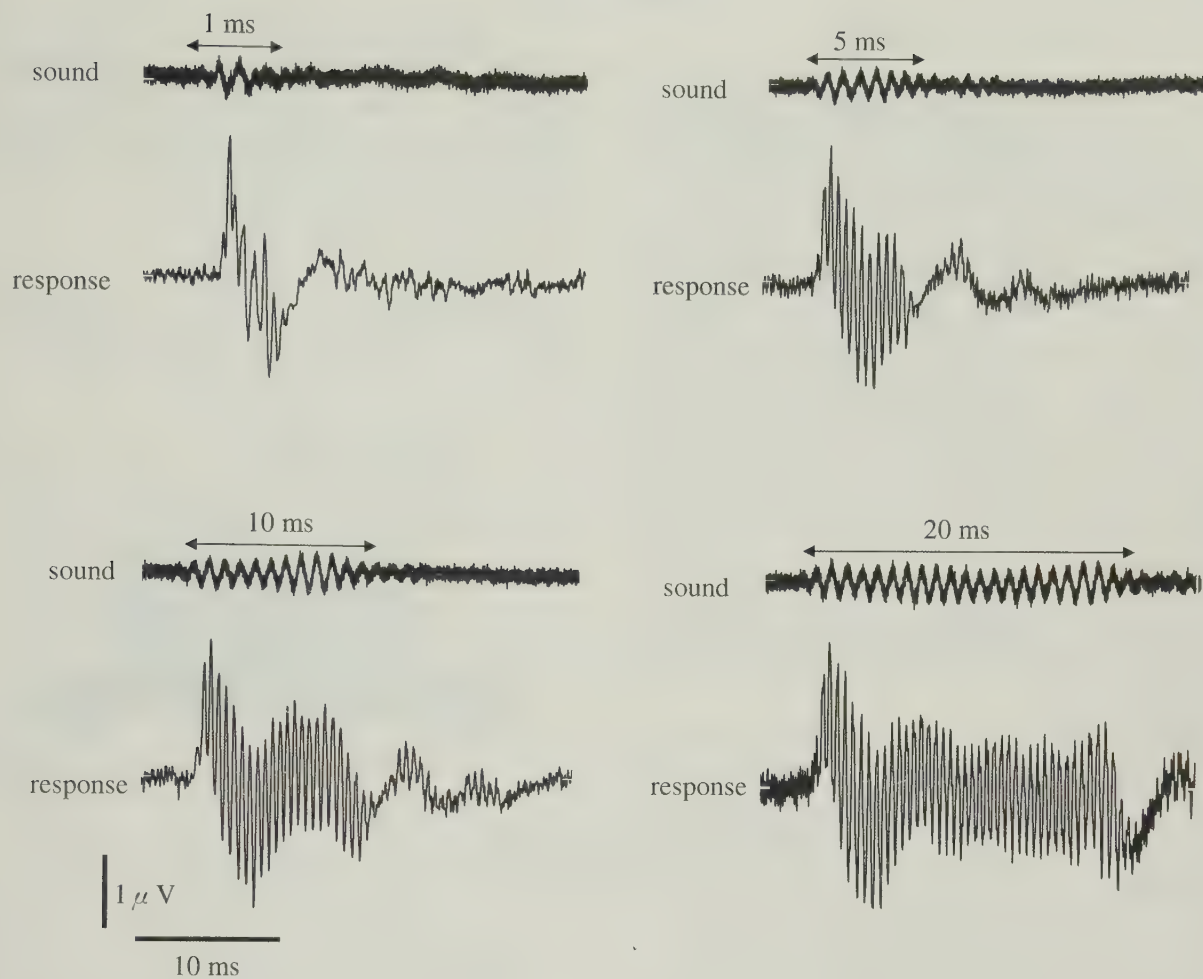


Fig. 2-8. ABR responses to each duration test sound stimuli (fish B1).

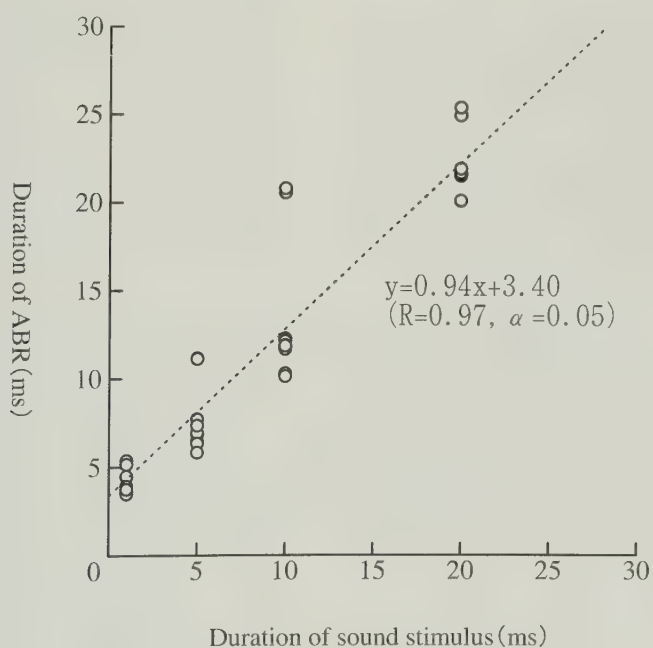


Fig. 2-9. Correlation between duration of sound stimulus and ABR

第3章 水中電極固定法

従来の魚類の聴性誘発反応の計測法（空中電極固定法）では小型の実験水槽に魚を入れ、頭部表皮を水面から軽く露出させ、マニピュレータ等を使って電極を確実に頭部表皮へ固定させる必要がある（Kenyon *et al.*, 1998；Akamatsu *et al.*, 2003）。空中電極固定法はキンギョ等の小型魚の計測に適しており、雑音除去の面から主に実験室で行われている。しかし商業的に重要な魚種であるマグロ類等の大型魚種については海中や大型水槽で実験することが必要となるため、これらの魚類の聴性誘発反応の計測には空中電極固定法を発展させる必要がある。また空中電極固定法は水槽の水面付近に魚を固定するが、水槽の水面付近は水槽の中心付近と比べ、音を放音したときの水の乱れが大きいことが考えられる。このようなことから供試魚を水中に沈め、大型水槽や海中でも聴性誘発反応が計測可能な方法を検討した。

水中で自由遊泳させた状態で臭いをかがせ、脳からの反応を計測する実験がヒメマス *Onchorhynchus nerka* やコイ *Cyprinus carpio* で行われている（佐藤，上田，1984；Kudo *et al.*, 1997）。また空中電極固定法の発展を目的としたものではないが防水された電極を使って、小型水槽に沈めて固定したアメリカンシャド *Alosa sapidissima* の聴性誘発反応が計測されている（Higgs *et al.*, 2004）。これらの報告ではいずれも魚体が水中に没した状態でも電位波形が記録されている。

本研究ではこれらの研究を参考にし、水槽の中央付近の水中に魚体を固定した方法（水中電極固定法と名付ける）で聴性誘発反応の計測を試みた。この方法で計測することが可能であれば大型水槽の中や海中でも聴性誘発反応を計測可能な方法に発展させることができると考えられる。最初の段階として、小型水槽を使

って空中電極固定法と水中電極固定法とでキンギョの聴性誘発反応と聴覚閾値を計測し、計測方法の課題と改良方法について検討した。なお、本実験では同一の個体を使ってこの二つの方法で聴性誘発反応と聴覚閾値を計測した。

3-1 供試魚

実験には尾叉長6.4～7.2 cmのキンギョ *Carassius auratus* 4尾を使用した。Table 3-1に供試魚の尾叉長と体重を示す。

3-2 実験装置および方法

Fig. 3-1に水中電極固定法での計測装置の概略を示す。頭部に電極を固定した供試魚を体サイズに合うように切り取ったネオプレンゴムを使って動かないように包み、プラスチック製のクリップで留め、方形ガラス水槽（34.0 cm × 20.0 cm × 24.5 cm）の中におもりをつけて約10 cm沈めて、包んだネオプレンゴムに糸を結んで反対側の糸にはクリップを結んで水槽の上枠の四隅にそのクリップで固定した。聴性誘発反応は50 Hz～10 kHzのバンドパスフィルターを通して生体電気アンプ（MEG1200, 日本光電）で増幅し、同一刺激音に対する反応を300回加算平均してからオシロスコープ（LC334M, LeCroy）に記録した。

聴性誘発反応を導出するための電極はテフロンコーティングされたタングステンを用い、基本的な部分は2章で用いたものと同様である。水中に没した魚で聴性誘発反応を計測するためには電極と電極に繋がれたコードの水没する部分を絶縁、防水する必要がある。そこで絶縁、防水できる自己融着テープ（スミテープ，住友電工）を使って電極とコードの水没する部分を丁寧に巻いた。さらに、テープの隙間から水が侵入しないようにするため、塗料（カシュー）をテープの隙間に塗付した。電極の関極と不関極との間隔を広くする

Table 3-1. Total length and body weight of fish

No.	TL (cm)	BW (g)
C1	7.2	13
C2	6.4	10
C3	7.1	14
C4	7.0	13
Mean	6.9	12.5
SD	0.4	1.9

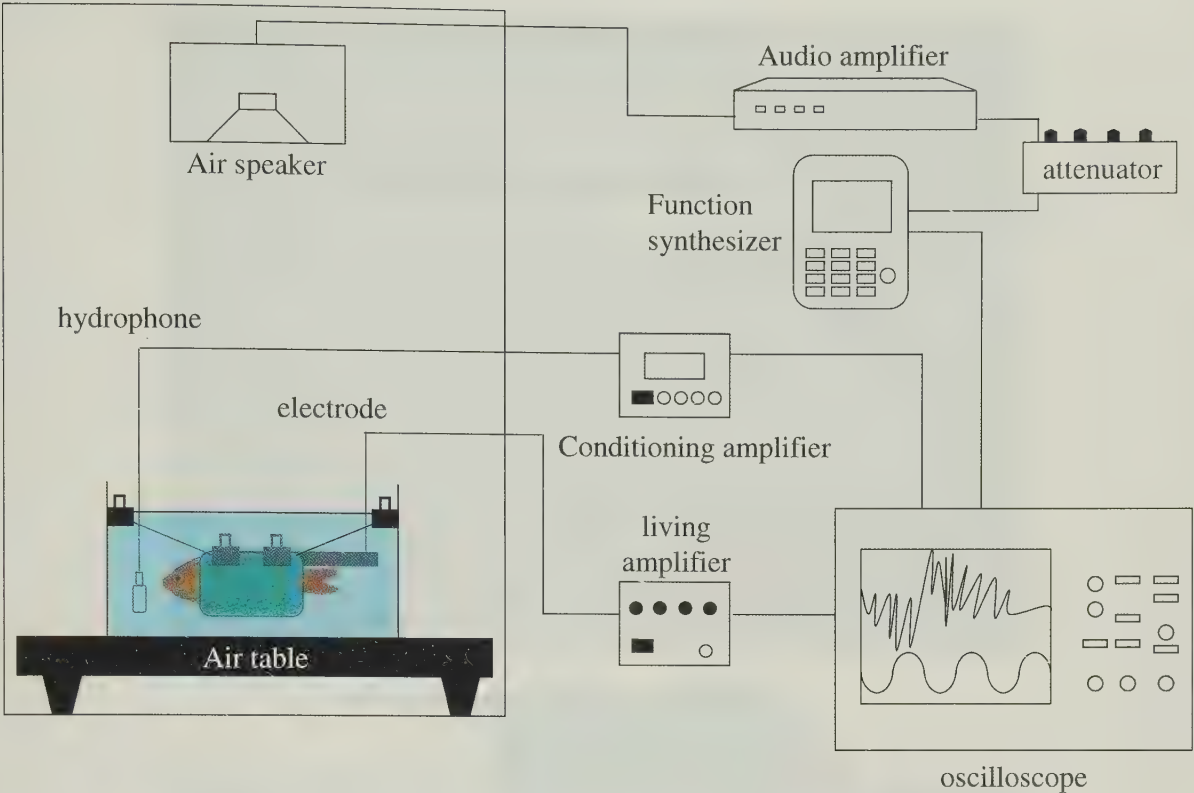


Fig. 3-1. Schematic diagram of the underwater ABR normal recording setup.

と電氣的ノイズが入るため、5 mm 程度の間隔としてノイズを防いだ。電極の位置はキンギョの頭部に見える中脳の中心に電極の関極を、そこから約 5 mm 前方へ不関極を表皮から約0.5 mm 挿入した位置で生体接着剤（DERMA BOND, Johnson & Johnson）を使って接着した。Fig. 3-2に絶縁防水した電極の構造図と、電極を魚に固定する方法を示す。また Fig. 3-3に電極の写真を示す。

刺激音はどの周波数も 5 周期分のトーンバースト音をマルチファンクションシンセサイザー（NF1930A, NF 回路設計ブロック）を使って発生させ、オーディオアンプ（SM-SX1, Sharp）で増幅し、供試魚から 1 m 以上上方に離れた空中スピーカから放音した。刺激音の音圧較正は第 2 章で示した方法に基づいて行った。刺激音には周波数 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz の音を使用した。サンプリング周波数は 50 kHz もしくは 20 kHz に設定した。刺激音と聴性誘発反応とは時間軸を同じにしてオシロスコープで観察し、記録した。供試魚の固定と電極の配置の写真を Fig. 3-4に示す。

水中電極固定法で計測した電位波形が空中電極固定法で計測した電位波形と同じであることを以下の方法で

確認した。Fig. 3-5に解析に用いた値の定義を示す。1 kHz の刺激音を与えたときの反応波形で最初の負の peak を N, 正の peak を P とし、反応が開始（振動が負になり始める点）してから N までの時間 Δt_1 (ms) と N から P までの時間 Δt_2 (ms) を符号検定により空中電極固定法と水中電極固定法とで差があるか検定した。

また N と P の振幅の絶対値を各々 $|AN|$, $|AP|$ とし、各個体毎に $|AP| + |AN|$ を求めて比較し、符号検定により差があるか検定を行った。さらに $|AP| + |AN|$ と音圧との関係を空中電極固定法と水中電極固定法別に回帰式で表わした。反応波形の周波数成分の分析は記録した反応波形の FFT によって行った。

電氣的ノイズの最大振幅 EN (μV) と反応波形の最大振幅 $|AP| + |AN|$ (μV) との比 (S/EN 比) に関しても 1 kHz の刺激音の場合について水中電極固定法と空中電極固定法とで同程度の音圧に対する反応波形から求め、水中電極固定法と空中電極固定法とで S/EN 比に差があるかどうかを符号検定により検定した。

聴覚閾値の計測方法は赤松（Akamatsu *et al.* ,

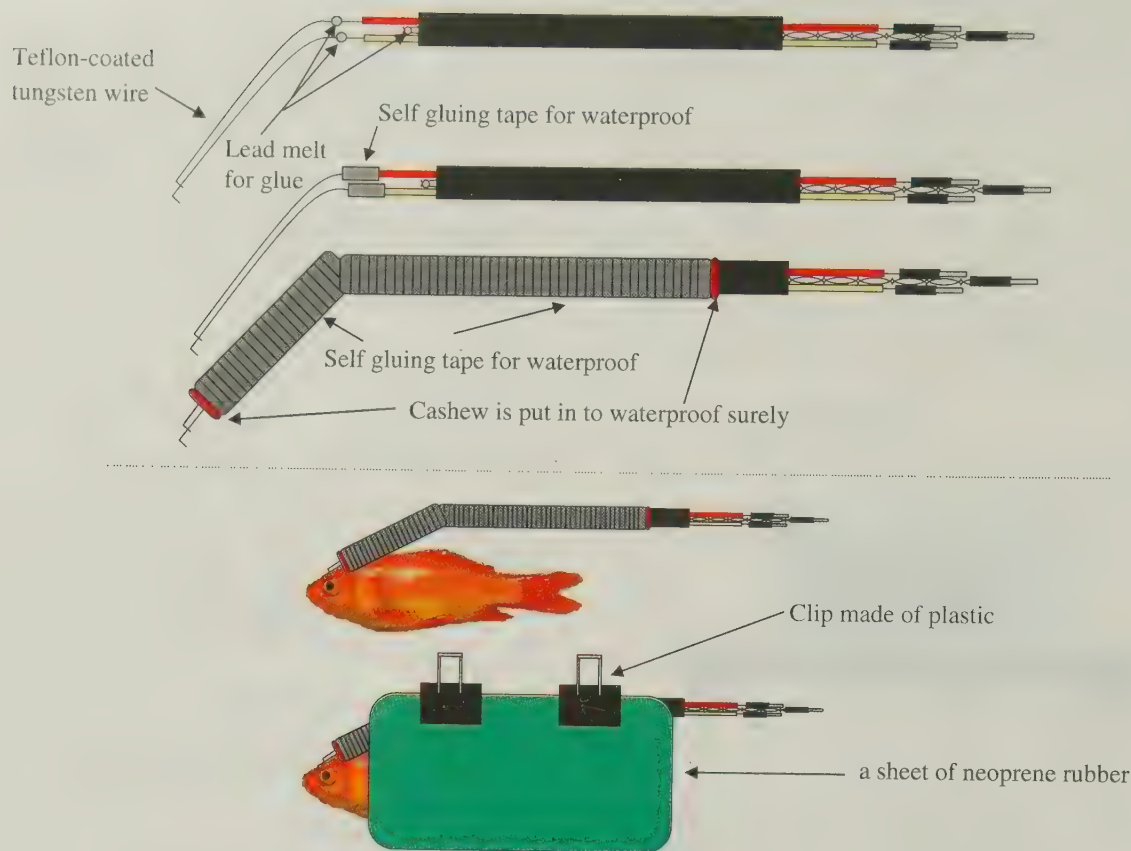


Fig. 3-2. Insulation and waterproof structure of the electrode and method of fixation with fish.

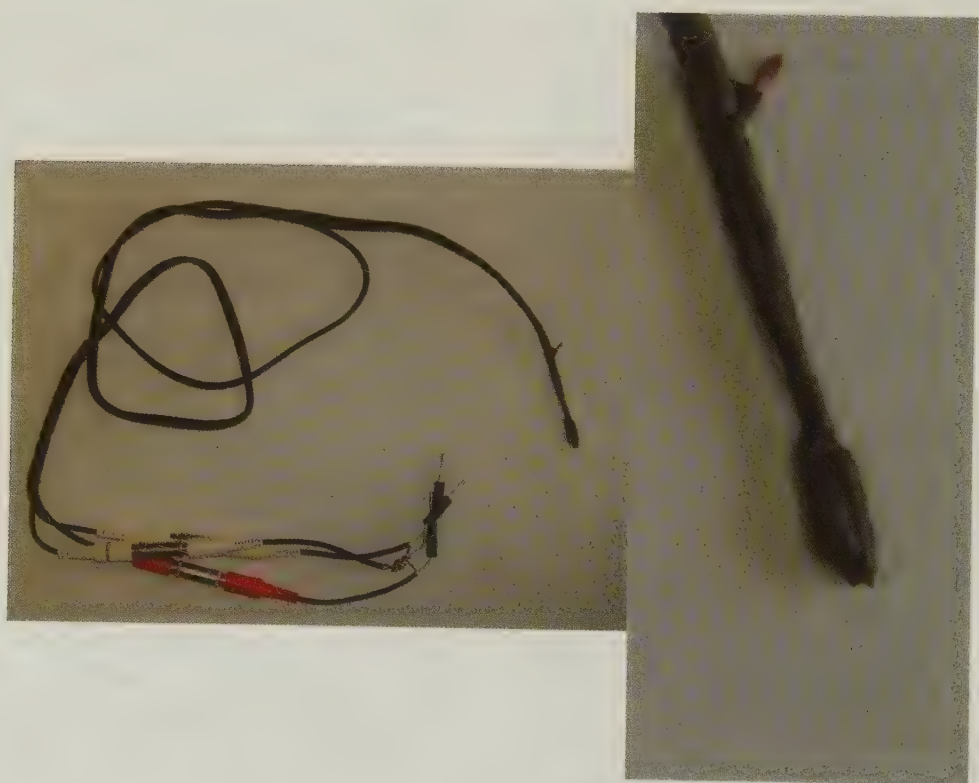


Fig. 3-3. Waterproof electrode to record ABR in underwater.

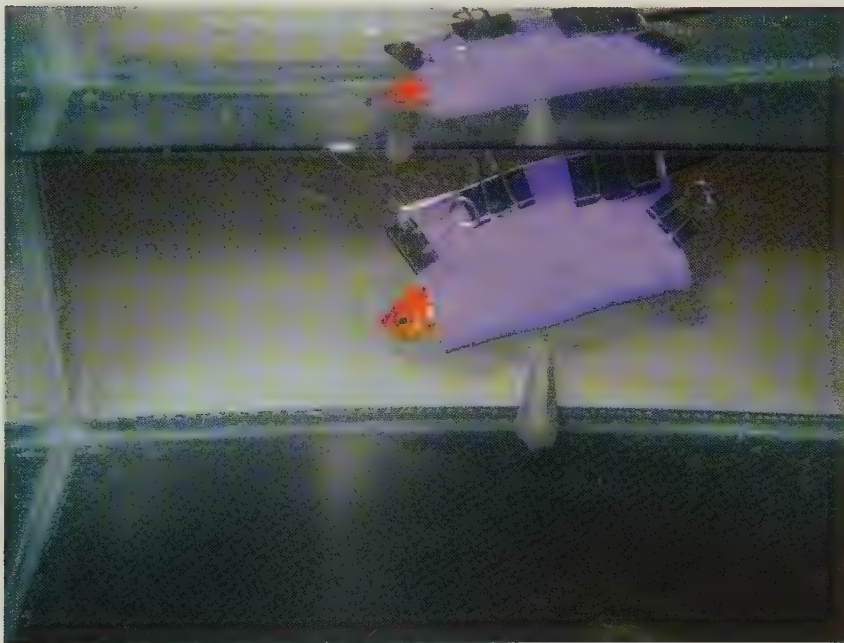
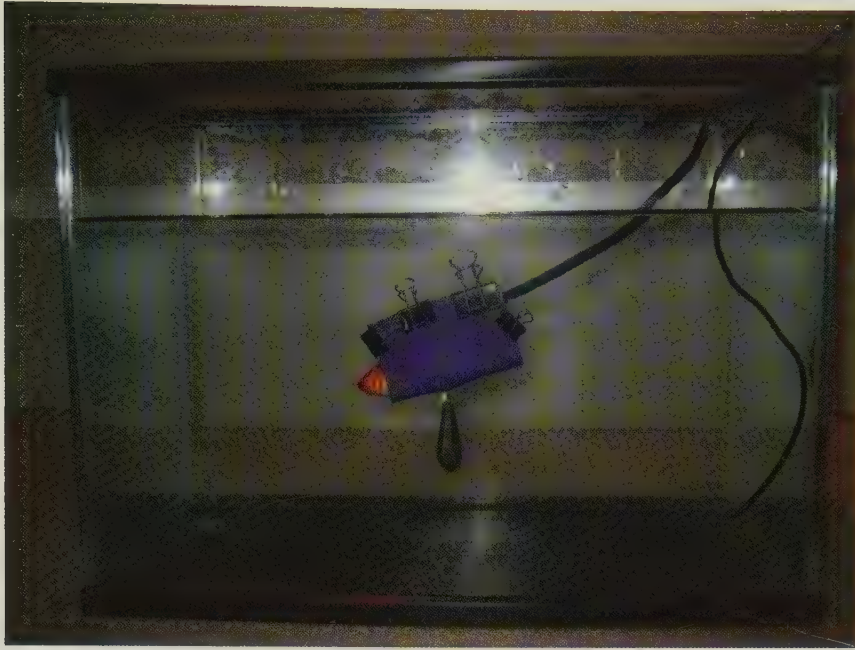


Fig. 3-4. Waterproof electrode and fixation with fish in underwater.

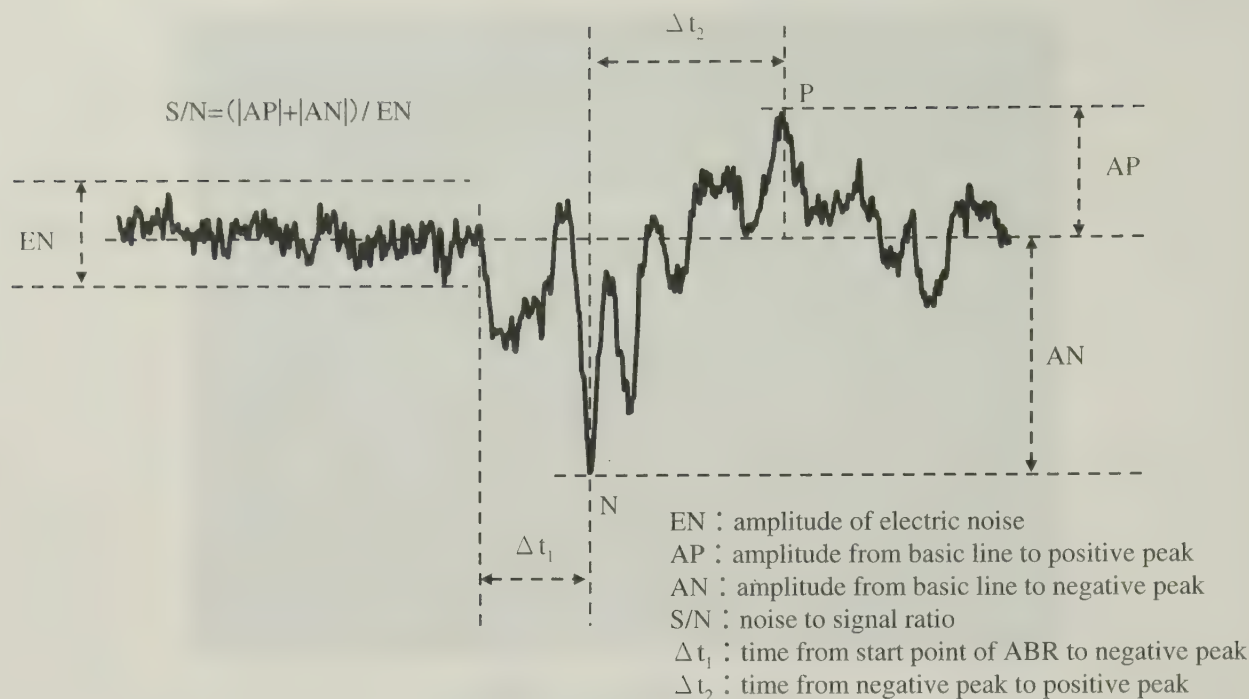


Fig. 3-5. Definition of ABR wave.

2003)の方法を参考にして行った。聴覚閾値は聴性誘発反応がオシロスコープ上で観察できた時の最も小さい音圧とした。聴覚閾値の計測方法をFig. 3-6に示す。まず初めに確実に反応が観られる音圧で聴性誘発反応を計測し、オシロスコープのスクリーンで反応を確かめた後に、刺激音の音圧を約10 dB ステップで減衰させていった。聴性誘発反応の振幅は音圧を下げるにつれて小さくなり、反応の振幅が通常生じている電気的な背景雑音に近づくにつれ音圧減衰を5 dB ステップへ変えて計測した。反応が観られるか雑音の方が大きくなって反応が観られなくなるかの聴覚閾値の音圧付近では2.5 dB ステップで音圧を変化させて計測を行った。また聴覚閾値に差が生じているかどうかを周波数毎に符号検定法によって検定した。

空中電極固定法での実験は水中電極固定法での実験が終了後、第2章と同様な方法で、魚を水槽水面付近にマニピュレータを使って固定して行った。

3-3 実験結果

Fig. 3-7に500 Hzの刺激音を聴かせたときに水中電極固定法で計測した聴性誘発反応と空中電極固定法により計測した聴性誘発反応とを供試個体C1の例で示す。典型的な反応波形の特徴は水中電極固定法で計測した波形も空中電極固定法で計測した波形もY軸(電圧軸)の基線が最初に負へ振れ、続いて正へ移動する

変化であった。

Table 3-2に比較に用いた刺激音の音圧と供試個体の対応を示す。音圧別に刺激音を各々S1, S2, S3と呼ぶことにする。Table 3-3にS1刺激音を聴かせたときの反応波形で反応が開始してからNまでの時間 Δt_1 (ms)とNからPまでの時間 Δt_2 (ms), $|AN| + |AP|$ を示す。

Δt_1 は水中電極固定法で求めた波形では平均 $3.88 \text{ ms} \pm 1.88$, 空中電極固定法では平均 $2.60 \text{ ms} \pm 0.27$ となり水中電極固定法と空中電極固定法で求めた波形に有意な差($p=0.625 > p=0.05$ 符号検定, 両側)はなかった。 Δt_2 は水中電極固定法で求めた波形では平均 $2.17 \text{ ms} \pm 0.63$, 空中電極固定法では平均 $3.51 \text{ ms} \pm 0.95$ となり有意な差($p=0.625 > p=0.05$ 符号検定, 両側)はなかった。 $|AN| + |AP|$ は水中電極固定法で求めた波形では平均 $3.86 \mu\text{V} \pm 0.90$, 空中電極固定法では平均 $3.24 \mu\text{V} \pm 0.13$ となり有意な差(符号検定, $p=0.75 > p=0.05$)はなかった。

Table 3-4に $|AP| + |AN|$ と刺激音の音圧との関係で空中電極固定法と水中電極固定法で求めた回帰直線を示す。Table 3-5, 3-6, 3-7に1 kHzの音を聴かせたときの反応波形に関して電気的ノイズの最大振幅ENと反応波形の最大振幅Sとの比をとったS/EN比の値を、刺激音の音圧別に示す。刺激音S1では水中電極固定法で求めた波形でS/EN比は

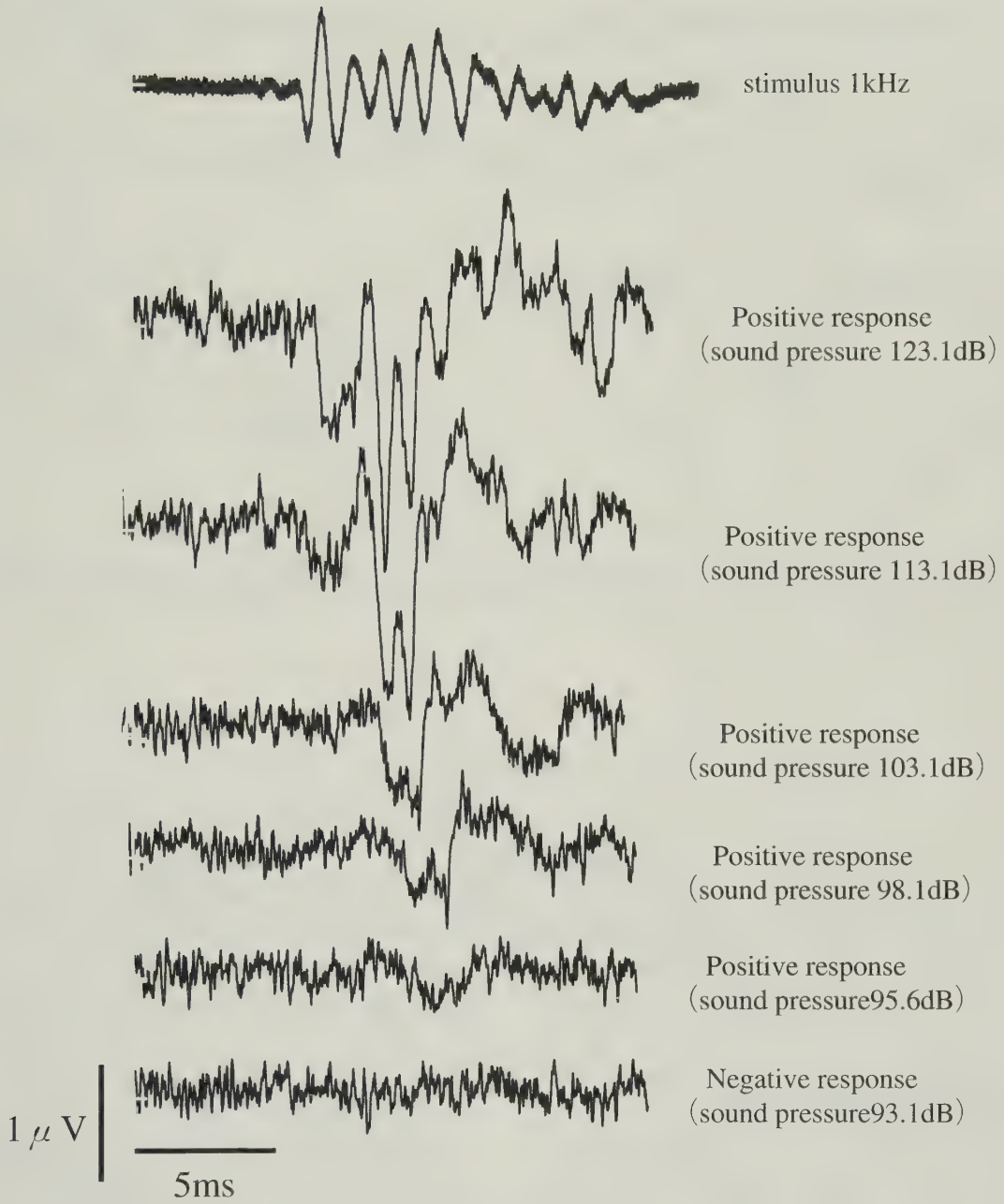


Fig. 3-6. The method to determine auditory thresholds.

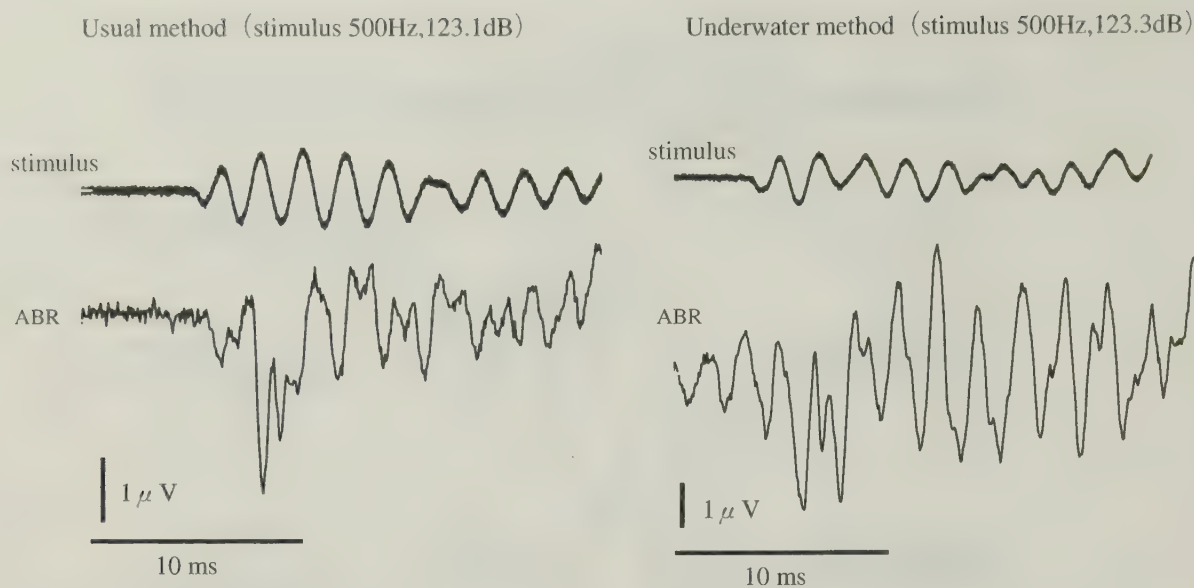


Fig. 3-7. Comparison between the ABR waveform to 500 Hz tone bursts of same fish recording by usual method and underwater method. Left side ABR is measured by usual method and right side is by underwater method. (fish C1).

Table 3-2. Sound pressure level used for each test

stimulus	Sound pressure (dB re 1 μ Pa)		
	Underwater method		Usual method
S1	122.1(C1,C2),	123.5(C4,C5)	123.1(C1,C2,C4,C5)
S2	112.1(C1,C2),	113.5(C4,C5)	113.1(C1,C2,C4,C5)
S3	102.1(C1,C2),	103.5(C4,C5)	103.1(C1,C2,C4,C5)

Table 3-3. Δt_1 (ms), Δt_2 (ms), |AN| + |AP| to stimulus S1

No.	Δt_1 (ms)		Δt_2 (ms)		AN + AP (μ V)	
	underwater	usual	underwater	usual	underwater	usual
C1	9.50	2.44	1.70	4.30	6.17	3.19
C2	1.96	2.28	0.86	4.58	2.62	3.60
C3	1.60	2.28	3.85	4.48	2.27	2.99
C4	2.44	3.40	2.28	0.68	4.38	3.18
Mean	3.88	2.60	2.17	3.51	3.86	3.24
SD	3.77	0.54	1.26	1.89	1.80	0.28

Table 3-4. Regression line between | AP | + | AN | and stimulus ($\alpha = 0.05$)

No.	Usual method	Underwater method
	$y=1.51x+1.19$	$y=4.35x+1.53$
C1	$F_{cal}=19.49>F^1_{n-2}=7.71$ (n=6)	$F_{cal}=7.92>F^1_{n-2}=7.71$ (n=6)
	$y=1.39x+1.95$	$y=1.07x+1.37$
C2	$F_{cal}=4.86<F^1_{n-2}=10.13$ (n=5)	$F_{cal}=8.10<F^1_{n-2}=18.51$ (n=5)
	$y=1.23x+1.39$	$y=0.85x+0.92$
C4	$F_{cal}=12.75>F^1_{n-2}=7.71$ (n=6)	$F_{cal}=15.12>F^1_{n-2}=5.12$ (n=11)
	$y=1.21x+1.51$	$y=2.44x+1.37$
C5	$F_{cal}=5.13<F^1_{n-2}=10.13$ (n=5)	$F_{cal}=34.31>F^1_{n-2}=5.99$ (n=8)
	$y=1.37x+1.47$	$y=1.70x+1.28$
Total	$F_{cal}=39.55>F^1_{n-2}=4.35$ (n=22)	$F_{cal}=13.55<F^1_{n-2}=4.21$ (n=29)

平均 6.35 ± 2.20 , 空中電極固定法では平均 6.02 ± 0.73 となり有意な差 ($p=0.625>p=0.05$ 符号検定 両側) はなかった。刺激音 S2 では水中電極固定法で求めた波形で S/EN 比は平均 7.04 ± 2.36 , 空中電極固定法では平均 4.80 ± 0.42 となり有意な差 ($p=0.75>p=0.05$ 符号検定 両側) はなかった。刺激音 S3 では水中電極固定法で求めた波形で S/EN 比は平均 4.15 ± 0.86 , 空中電極固定法では平均 3.94 ± 0.44 となり有意な差 ($p=0.75>p=0.05$ 符号検定 両側) はなかった。

反応の持続時間は水中電極固定法と空中電極固定法とではほぼ同じ音圧で計測できた C1 と C5 の二個体についてみると刺激音の持続時間 (250 Hz, 約20 ms ; 500 Hz, 約10 ms ; 1 kHz, 約5 ms ; 2 kHz, 約2.5 ms ; 4 kHz, 約1.25 ms) に対して水中電極固定法と空中電極固定法のどちらの方法でも少し長く反応が記録された。

空中電極固定法と水中電極固定法とで計測したキンギョの聴覚閾値を Table 3-8, 3-9に, 聴覚閾値曲線を Fig. 3-8に示す。水中電極固定法と空中電極固定法で求めた聴覚閾値のうちで最も聴覚閾値が低くなった周波数は水中電極固定法で計測された500 Hzであり, 音圧は約78 dBであった。

同一個体を使って水中電極固定法と空中電極固定法で求めた聴覚閾値の計測値に差が生じているかどうかを250 Hzで4個体, 500 Hzで4個体, 1 kHzで4個体に関して符号検定法で調べた結果, 250 Hz ($p=0.75>0.05$ 両側), 500 Hz ($p=0.125>p=0.05$ 両側), 1 kHz ($p=0.125>p=0.05$ 両側) でいずれも有意差はなかった。2 kHz と4 kHz は計測値が2個体以下と少なかったため検定は行わなかった。水中電極固定法と空中電極固定法で求めた聴覚閾値の平均値で比較したとき、周波数が増えるにつれて聴覚閾値の平均値が大きくなった周波数は1 kHzと2 kHzであったが、どちらの周波数でも差は約5 dBであり、過去の報告で求められているキンギョの聴覚閾値の標準偏差の範囲 (Kenyon *et al.*, 1998) に入る差であった。

実験水槽の水温は8.5℃～11.8℃だった。防音室内の騒音の音圧はFFT分析では各刺激音の周波数でそれぞれ約60 dB以下であった。

3-4 考察

反応波形は水中電極固定法で計測した波形も空中電極固定法で計測した波形も Y 軸 (電圧軸) の0 Vを基準として最初に基線が負へ移動し, 続いて正へ基線が移動する変化があった。第2章でも述べたが, こ

Table 3-5. S/N ratio to S1 stimulus

No.	S/N	
	Underwater method	Usual method
C1	12.80	4.02
C2	2.90	7.32
C4	4.63	5.84
C5	5.05	6.89
Mean	6.35	6.02
SD	4.40	1.47

Table 3-6. S/N ratio to S2 stimulus

No.	S/N	
	Underwater method	Usual method
C1	14.02	3.83
C2	5.84	5.67
C4	4.02	4.39
C5	4.28	5.32
Mean	7.04	4.80
SD	4.72	0.84

Table 3-7. S/N ratio to S3 stimulus

No.	S/N	
	Underwater method	Usual method
C1	4.95	2.81
C2	2.44	4.63
C4	—	4.62
C5	5.06	3.68
Mean	4.15	3.94
SD	1.48	0.87

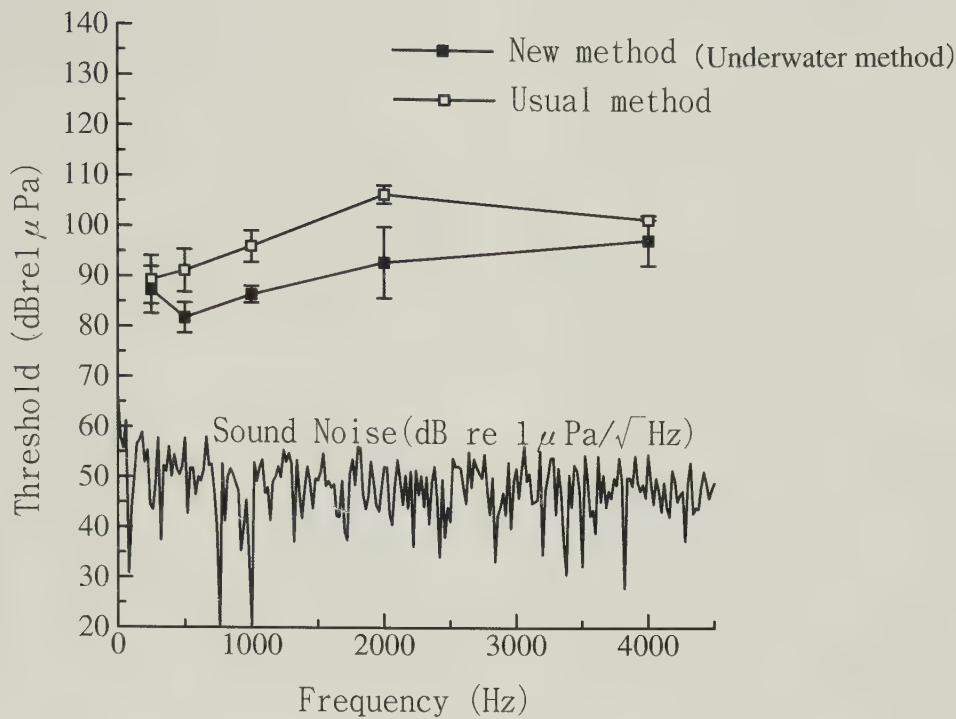


Fig. 3-8. Mean auditory thresholds and standard deviation of four goldfish (*Carassius Auratus*) obtained by usual and new underwater ABR method.

Table 3-8. Auditory threshold of goldfish *Carassius auratus* by usual ABR method

No.	Auditory threshold (dB re 1 μ Pa)				
	Stimulus sound (Hz)				
	250	500	1000	2000	4000
C1	83.1	93.1	95.6	105.6	102.1
C2	88.1	85.6	93.1	—	—
C4	93.1	90.6	95.6	—	—
C5	93.1	95.6	100.6	108.1	—
Mean	90.2	92.0	96.7	106.9	102.1
SD	4.79	4.27	3.15	1.77	—

(Unit : dB re 1 μ Pa)

Table 3-9. Auditory threshold of goldfish *Carassius auratus* by underwater ABR method

No.	Auditory threshold (dB re 1 μ Pa)				
	Stimulus sound (Hz)				
	250	500	1000	2000	4000
C1	83.8	83.2	87.1	91.3	105.8
C2	91.3	78.2	92.1	103.8	100.8
C4	85.6	85.3	88.5	103.7	—
C5	90.6	82.8	88.5	103.7	—
Mean	88.4	82.7	89.3	101.2	103.7
SD	3.69	2.99	2.14	7.19	3.54

(Unit : dB re 1 μ Pa)

のように負から正へと基線が移動する特徴はこれまでに報告されている聴性誘発反応の特徴 (Wysocki and Ladich, 2002) ととも一致する。

Δt_1 (ms) と Δt_2 (ms) は水中電極固定法と空中電極固定法で求めた波形に有意な差はなかった。また 1 kHz で得られた反応波形の | AN | + | AP | も有意な差はなかった。1 kHz の音を聴かせたときに計測できた | AP | + | AN | と、そのときの音刺激の音圧との関係についても空中電極固定法と水中電極固定法とで有意な差は無かった。魚を固定する計測位置や電極の位置が異なるため波形の特徴が多少異なることは考えられるが、水中電極固定法と空中電極固定法で計測した反応波形はほぼ似た特徴を持っていることがわかる。反応の継続時間が各音刺激の持続時間よりも少し長く記録されたことについては小型水槽での実験であったため音刺激が水槽内で反射して音刺激が少し長く生じていたことが原因である可能性がある。

本実験での水中電極固定法と空中電極固定法の2つの方法で求めた聴覚閾値は以前に求められているキンギョの聴覚閾値 (Kenyon *et al.*, 1998) より高くなった。本実験は水温 8.5 °C ~ 11.8 °C で行ったが先行研究の実験では水温約 25.0 °C で行われている。ニジマス *Onchorynchus mikiss* では水温が低くなると聴覚閾値が高くなるという報告がされている (Yamakawa *et al.*, 1998) ため、聴覚閾値が高くなった原因の1つには水温の影響が考えられる。

本研究では水中電極固定法でも空中電極固定法で計測したときと同じような反応波形と聴覚閾値を得ることができた。この水中電極固定法を大型魚種を対象として海中や大型水槽で行うためには対象種に応じた電極の位置の検討や雑音除去の方法等様々な課題を克服する必要がある。

第4章 空中電極固定法を用いた水産有用魚類の聴覚計測

聴性誘発反応法は心電図法と比較して、同一個体を繰り返し使用できることや小型の魚類についても手術等を行うことなく適用が可能なのが利点である。また第3章で用いた水中電極固定法を発展させることで多くの魚類について聴覚特性を測定できる可能性もある。この聴性誘発反応を用いて従来測定されてこなかった魚種について聴覚特性を調べることにした。

4-1 イカナゴ稚魚の聴覚閾値

イカナゴ *Ammodytes personatus* は日本に置ける重要な水産資源であり、正確な資源量の推定が必

要となっている。個体群構造は詳細に研究され、(Funakoshi, 1998) 漁獲量は 1978~1982 年にかけて減少したが、その後、資源を増やす努力がなされてきている (Hashimoto, 1984; 永島, 2001)。資源量推定は標識を取付けた魚を再捕して検討する方法、魚群探知器で受波する魚群からのエコーによって魚群量を推定する方法等で行われている。この時、調査船の騒音によってイカナゴが逃避し、推測される魚群量が少なく見積られていることが考えられる。したがって船の騒音に反応してイカナゴがどのように行動するかを調べる必要がある。このためにはイカナゴの聴覚特性を知る必要がある。一般に船から発せられる騒音は主に 100 ~ 500 Hz の周波数範囲にあることが知られている (Hatakeyama *et al.*, 1997)。またブリ *Seriola quinqueradiata* 等のイカナゴ捕食者 (柳橋ら, 1997) の遊泳音は数 10 ~ 数 100 Hz であることが報告されている (藤枝ら, 1994)。そこでイカナゴの聴覚閾値を 100 ~ 500 Hz の周波数範囲で求め、船の騒音との関連について検討した。

4-1-1 供試魚

実験には瀬戸内海で漁獲された尾叉長 6.3 ~ 8.8 cm のイカナゴ *Ammodytes personatus* 13尾を使用した。供試魚の尾叉長を Table 4-1-1 に、イカナゴの写真を Fig. 4-1-1 に示す。なお供試魚は底に砂を敷いたガラス水槽の中で水温 21.8 ~ 24.8 °C で飼育した。

4-1-2 実験装置および方法

実験装置の概略を Fig. 4-1-2 に示す。供試魚は実験時に飼育水槽から取り出し、魚のサイズに切り取ったプラスチックのメッシュ (目合約 2 mm) で包んでからクリップで留めて保定し、中脳のある頭皮の部分を数 mm 水面より空気中へ露出させ、残りの部分は水没させて海水を満たした角形のガラス水槽 (34.0 × 20.0 × 24.5 cm, 供試個体 D1 ~ D7 のイカナゴで使用)、もしくは角形のプラスチック容器 (41.0 × 28.5 × 4.5 cm, 供試個体 D8 ~ D13 のイカナゴで使用) 内にクランプを使って固定した。実験水槽は最初、角形ガラス水槽を使っていたが、魚の固定が容易なことから D7 を計測した後、角形プラスチック容器へ換えた。このため2つの水槽で実験を行ったが同じ時期の同じ場所 (位置) での計測であるため背景雑音は変わらないとした。魚体への電極の挿入、装着は第2章の方法と同様に行った。電極から導出される微小電位は生体電気アンプ (MEG1200, 日本光電) で増幅してオシロスコープ (LC334M, LeCroy) に記録し、同一刺激に対する 0.1 秒間の反応を 300 回加算平均して記録し

Table 4-1-1. Total length of fish

No.	TL (cm)
D1	7.5
D2	7.4
D3	7.9
D4	7.1
D5	7.2
D6	7.3
D7	7.3
D8	7.7
D9	7.2
D10	6.6
D11	6.3
D12	8.8
D13	7.4
Mean	7.4
SD	0.59



Fig. 4-1-1. Japanese sand lance *Ammodytes personatus*.

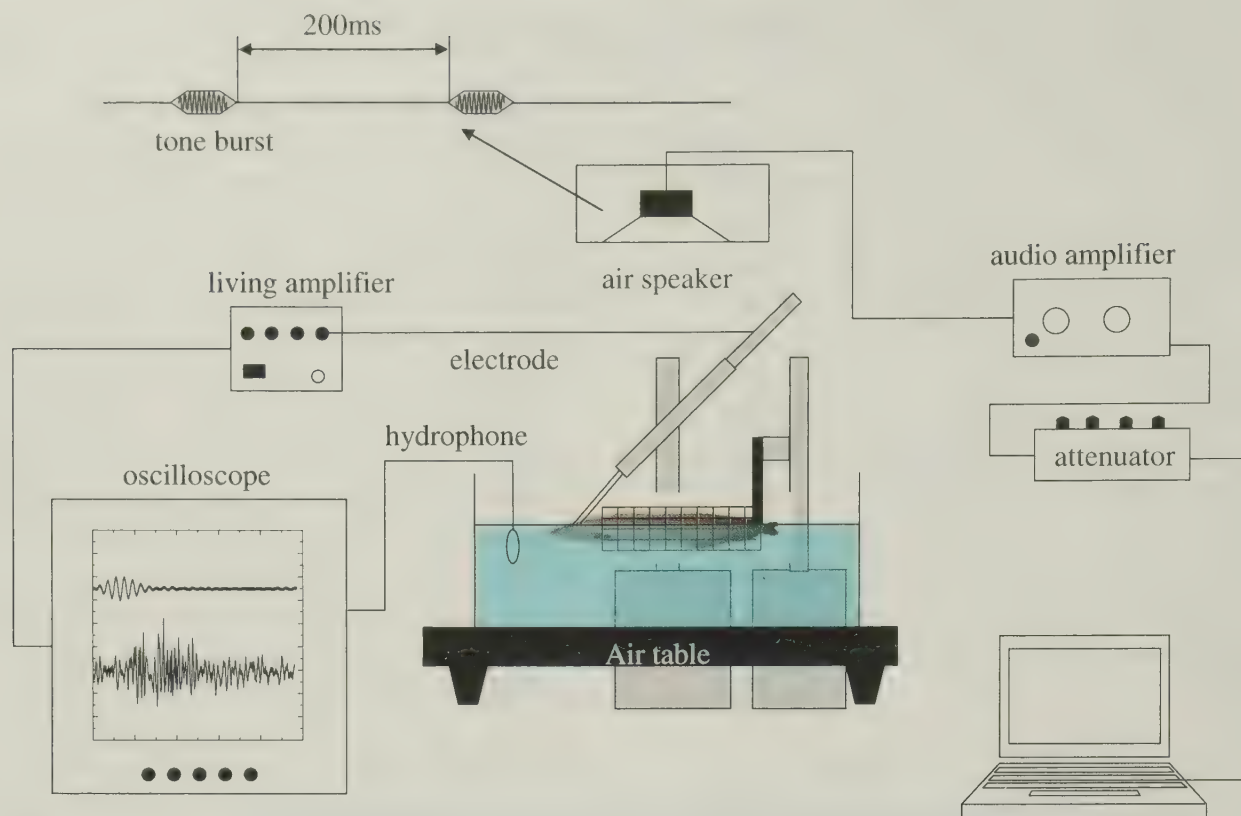


Fig.4-1-2. Schematic diagram of the ABR recording setup.

た。

音圧レベルは減衰器 (Kenwood RA920A, Kenwood) を使って調節した。放音のための空中スピーカは魚から45 cm 以上離れた上方の位置に設置した。刺激音には128 Hz, 181 Hz, 256 Hz, 362 Hz, 512 Hz の周波数を使用し、音圧の較正は第2章の方法に基づいて行った。

音を感知しているのかどうかの判定は先行研究 (Kenyon *et al.*, 1998) を参考とし、反応の振幅がノイズレベル (常時記録されている脳幹からの波形と電氣的ノイズの合計) より大きければ感知しているものとし、ノイズレベルと同レベルであれば感知無しとした。死亡個体で同様の測定を行っても導出電位がノイズレベルと同等になることも確認した。

各周波数で求めた反応波形にどの程度再現性があるのかを知るために D8 ~ D13 に関して実験の最初と最後に聴覚閾値より比較的高い音圧を繰り返し与えた時に記録した2つの反応波形 (300回加算平均した2つの波形) を用いてケンドールの相関係数 τ を求めた。2つの反応波形で振幅が最大となる範囲を含む0.02秒間のデータを使用した。検定には電圧値 (Y 軸) のみ

を使用した。 τ は $-1 \sim 1$ の間の値をとり、2つの波形同士が類似しているほど τ は1に近づく (全く同じだと τ は1), 異なっているほど -1 に近づく (波形が全く反対だと τ は -1)。

聴覚閾値の計測は先行研究 (Akamatsu *et al.*, 2003) を参考に約130 dB re $1 \mu\text{Pa}$ の音圧から始め、第3章と同様に刺激に対する反応が波形の中に明瞭に見られなくなった音圧を聴覚閾値とした (Fig. 4-1-3)。各周波数で得られた各個体の聴覚閾値を平均し、聴覚閾値曲線を求めた。また Wilcoxon の符号順位検定法と符号検定法によって測定周波数間の聴覚閾値の差を検定した。また記録した聴性誘発反応波形の周波数成分の特徴を求めるために300回加算平均して記録した0.1秒間の反応波形を FFT 解析した。

4-1-3 実験結果

刺激音の周波数のすべてについてイカナゴの聴性誘発反応を計測することができた。Fig. 4-1-4に256 Hz の刺激音に対して得られた聴性誘発反応の例を示す。また128 ~ 362 Hz の音に対して得られた聴性誘発反応波形は FFT 解析の結果から刺激音周波数の約2倍

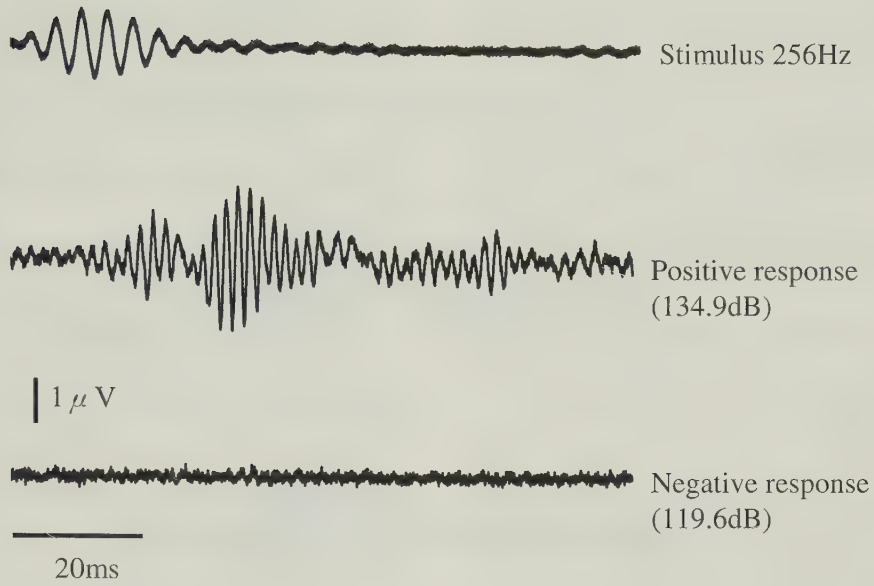


Fig. 4-1-3. Example of positive and negative ABR to 256 Hz sound stimulus.

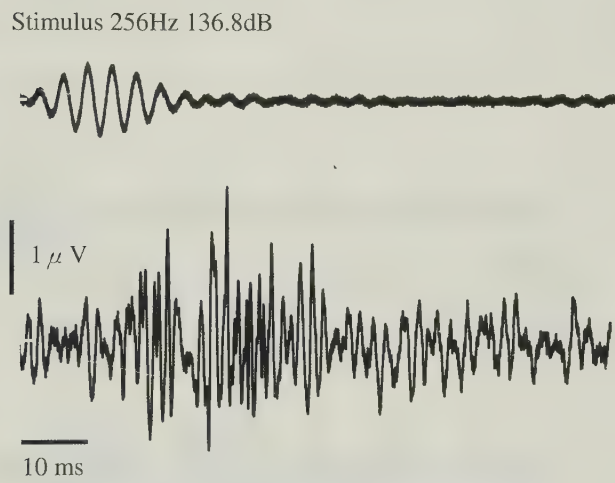


Fig. 4-1-4. Example of ABR to 256 Hz sound stimulus (D8).

の周波数成分を持っていた。FFT 解析の結果のうち刺激音256Hzの例を Fig. 4-1-5に示す。実験水槽内の騒音はFFT 分析により求めると60 dB以下であった

反応波形の特徴は基線（約0 V）についても振動が見られることである。反応は放音が終わっても継続し、オシロスコープの記録限界時間を超えても反応が続いており、今回の計測機器では持続時間を計測できなかった。

Fig. 4-1-6, 4-1-7に同一の音刺激に対して2回計測したD10の256 Hz, 136.8 dBの刺激音とD13の362 Hz, 135.3 dBの刺激音に対する反応波形を例として示す。2つの波形からケンドールの相関係数 τ を求めた時の音圧と求まった τ の結果を Table 4-1-2, Table 4-1-3に示す。 $\tau = 0.3$ 以下だと反応波形は違った波形に見え、0.3以上だと同じ波形に見えるためYan (2000) は聴性誘発反応が生じているかどうかの基準となる相関係数を0.3としている。この値を基準とすると τ は23回計測した実験の内、刺激音周波数128Hzで1個体、および512 Hzで3個体において0.3以下となった以外は全て0.3以上となった。

Fig. 4-1-8にイカナゴが活魚の状態と死魚の状態で

計測した聴性誘発反応を256 Hzの音刺激に対する1個体の反応を例として示す。死魚では聴性誘発反応は見られず、電気的なノイズのみが記録されている。

すべての供試魚で得られた各周波数の聴覚閾値を Table 4-1-4, 4-1-5に示す。個体D8～D13に関して聴覚閾値の平均値を用いて求めた聴覚閾値曲線を Fig. 4-1-9に示す。

聴覚閾値は128～256 Hzの範囲で低くなり、約113～118 dBであった。ガラス水槽とプラスチック水槽で得られた各周波数の聴覚閾値について対応する隣同士の周波数の聴覚閾値を総括してWilcoxonの符号順位検定法で検定した結果、128 Hzと181 Hz ($n=10$), 181 Hzと256 Hz ($n=11$), 256 Hzと362 Hz ($n=10$) 間では有意差はなく ($\alpha = 0.05$)、362 Hzと512 Hz ($n=9$) 間で有意差があった ($\alpha = 0.05$)。一方、符号検定では128 Hzと181 Hz ($n=10$, $P=1.246 > 0.05$ 両側) および181 Hzと256 Hz ($n=11$, $P=1.0 > 0.05$ 両側) 間では有意差はなく ($\alpha = 0.05$)、256 Hzと362 Hz ($n=10$, $P=0.0214 < 0.05$ 両側) および362 Hzと512 Hz ($n=9$, $P=0.0039 < 0.05$ 両側) では有意差が認められた ($\alpha = 0.05$)。なお、実験時の水温は20.0～25.1℃であった。

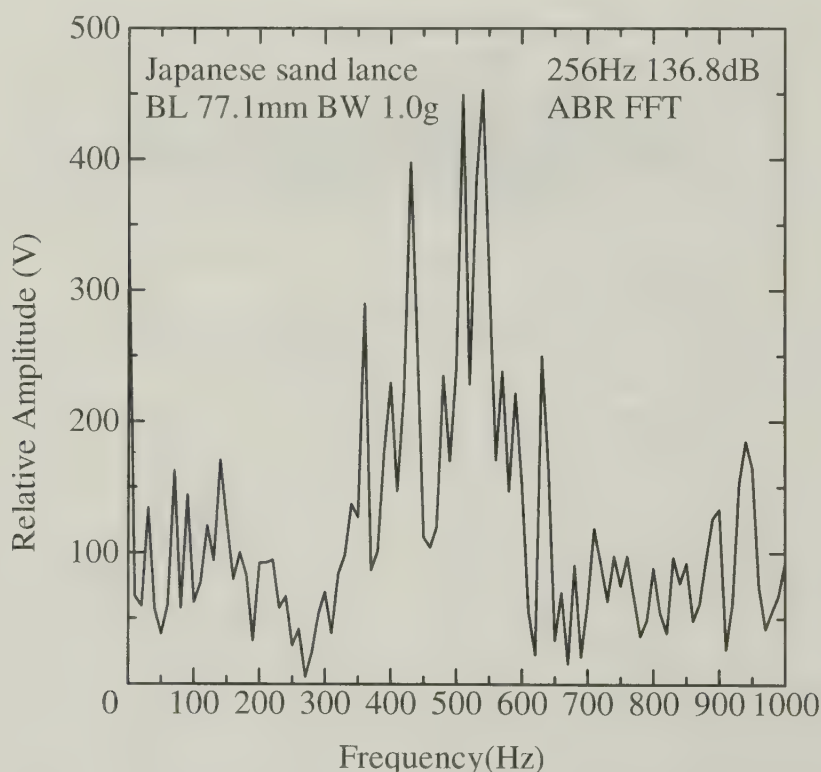


Fig. 4-1-5. Fourier transforms of ABR waveform for Japanese sand lance to 256 Hz stimulus.

Stimulus 256Hz, 136.8dB

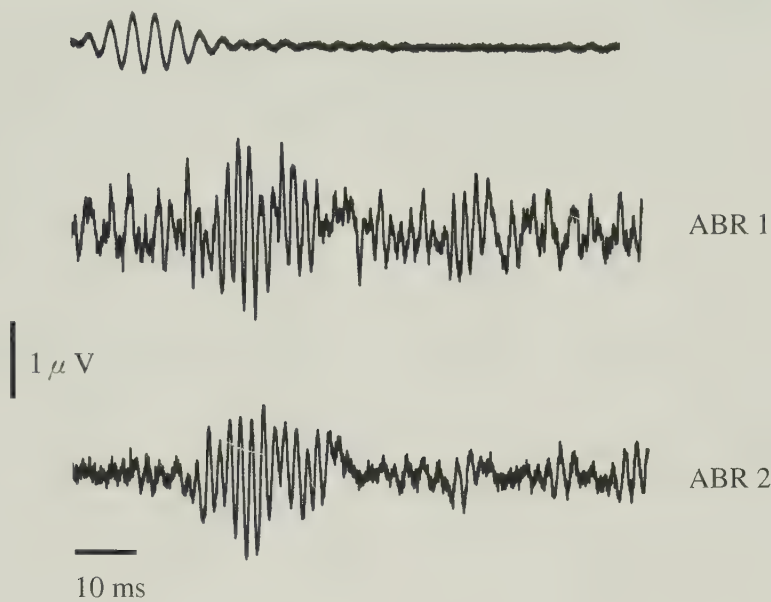


Fig. 4-1-6. Two ABR wave to stimulus 256 Hz, 136.8 dB. Kendall correlation coefficient $\tau = 0.580$.

Stimulus 362Hz, 135.3dB

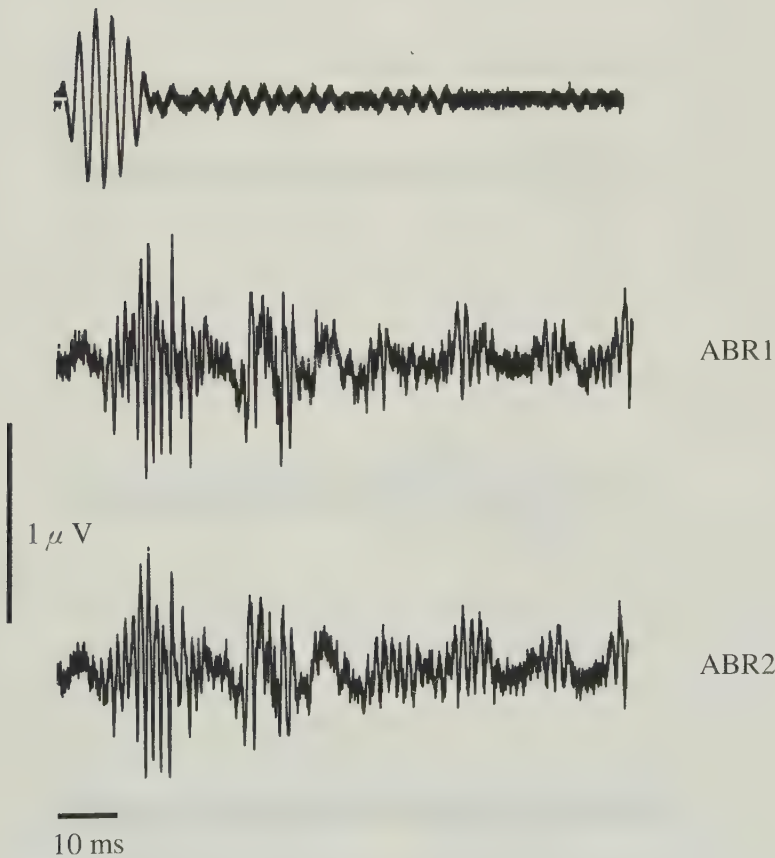


Fig. 4-1-7. Two ABR wave to stimulus 362 Hz, 135.3 dB. Kendall correlation coefficient $\tau = 0.777$.

Table 4-1-2. Sound pressure of ABR experiment for calculating Kendall correlation coefficient.

No.	Sound pressure (dB)				
	frequency (Hz)				
	128	181	256	362	512
D8	122.6	—	134.9	135.3	—
D9	122.6	128.1	131.8	135.3	133.2
D10	122.6	128.1	136.8	135.3	133.2
D11	122.7	128.1	—	135.3	143.5
D12	—	—	136.8	—	—
D13	122.6	128.1	136.8	135.3	133.2

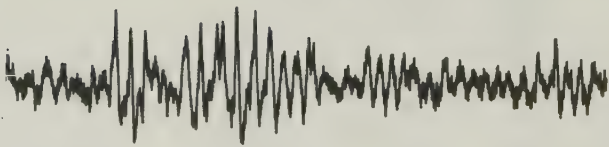
Table 4-1-3. Kendall correlation coefficient τ

No.	frequency (Hz) / sound pressure (dB)								
	128/122.6	128/127.7	181/128.1	256/131.8	256/134.9	256/136.8	362/135.3	512/133.2	512/143.5
D8	0.266	—	—	—	0.537	—	0.779	—	—
D9	0.649	—	0.762	0.307	—	—	-0.309	0.495	—
D10	0.411	—	0.841	—	—	0.580	0.696	0.219	—
D11	—	0.428	0.828	—	—	—	0.421	—	0.195
D12	—	—	—	—	—	0.329	—	—	—
D13	0.709	—	0.439	—	—	0.593	0.777	0.211	—

Stimulus 256Hz, 136.8dB



living fish



1 μ V

10ms

dead fish



Fig. 4-1-8. Response of living fish and dead fish (D13)

Table 4-1-4. Auditory threshold (dB re 1 μ Pa) of Japanese sand lance. (water tank 34×20×24.5 cm)

No.	Auditory threshold (dB re 1 μ Pa)				
	frequency (Hz)				
	128	181	256	362	512
D1	115.4	120.0	114.5	119.2	131.3
D2	—	124.5	119.1	—	—
D3	115.4	115.4	120.6	125.2	131.3
D4	111.2	113.9	119.1	124.2	127.7
D5	116.8	121.5	111.5	122.2	131.3
D6	119.7	124.5	120.6	127.0	131.3
D7	118.2	124.5	119.1	—	—
Mean	116.5	121.5	118.3	124.0	130.7
SD	2.93	4.45	3.45	2.99	1.61

Table 4-1-5. Auditory threshold (dB re 1 μ Pa) of Japanese sand lance. (water tank 41×28.5×4.5 cm)

No.	Auditory threshold (dB re 1 μ Pa)				
	frequency (Hz)				
	128	181	256	362	512
D8	120.1	115.1	119.6	126.4	—
D9	116.1	105.4	119.6	120.9	131.4
D10	120.1	115.1	122.7	128.3	133.2
D11	125.2	118.4	118.0	131.9	141.8
D12	—	—	128.8	—	—
D13	107.2	102.2	127.3	117.2	128.0
Mean	119.5	113.2	123.7	126.4	135.2
SD	6.72	7.02	4.46	5.88	5.88

4-1-4 考察

同一音に対して2回記録した反応波形間のケンドールの相関係数 τ は23例中、4例を除いて全て聴性誘発反応が生じている証拠の基準とされる0.3以上 (Yan *et al.*, 2000) となった。この結果から聴性誘発反応の測定ではほぼ安定した応答を測定できていると考えられる。聴性誘発反応が刺激音周波数の2倍の周波数成分をもっていたことは、同様にニシン科魚類の聴性誘発反応 (Mann *et al.*, 2001) でも計測されていることから、魚類の聴性反応の特徴の一つであると考えられる。

周波数128 ~512 Hz の範囲では256 Hz 以下の周波数範囲が比較的感度が良いが、362 Hz や512 Hz の高周波数になると閾値がやや高くなる傾向がある。512 Hz では反応に2倍の周波数成分が含まれなくなった。2倍の周波数成分が含まれなくなると周波数弁別ができなくなるという報告 (安楽, 1998) もあり、また音圧を上げてても相関係数が0.3以下となったことから、計測周波数範囲では512 Hz が最も感知能力の悪い周波数であったと考えられる。

イカナゴ稚魚の聴覚閾値は128 ~362 Hz で約120 dB となり、第3章で求めたキンギョの聴覚閾

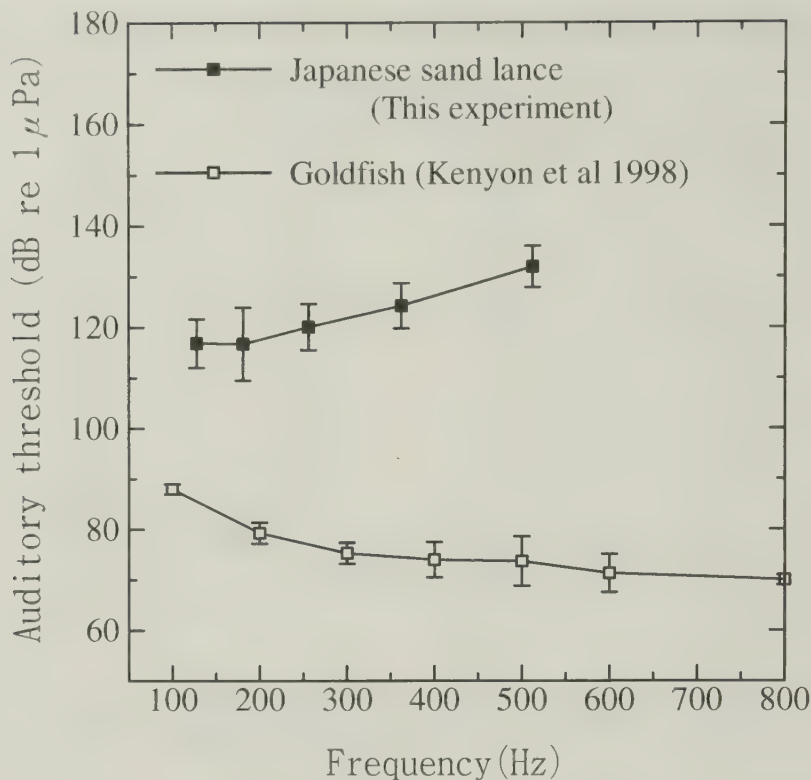


Fig. 4-1-9. Audiograms for each frequency of Japanese sand lance.

値より高くなった。キンギョは骨鰈魚であり、鰈と内耳とがウェーバー小骨で連結されている。そのため、聴覚感度が良いことが知られている (Ladich and Wysocki, 2003) のに対し、イカナゴはこのような聴覚補助器官と考えられている鰈を有していない (Yamashita *et al.*, 1985) ため、聴覚閾値が高くなったと考えられる。

海に生息する魚類が実際に聴くことのできる音の大きさは、実験室で騒音が極力排除された静かな環境で求められた聴覚閾値とは異なり、周辺の雑音に影響されるマスキング現象が生じる。この時の臨界比は20～30 dB (Chapman, 1973) とされている。海での環境雑音は海域によって異なることが考えられるが、静寂時では周波数100 Hz～1 kHzで約110 dB以上であるとの報告 (Wenz, 1962) があり、これを参考にするるとイカナゴ稚魚が実際に聴くことのできる音圧は周波数約100 Hz～500 Hzで約130 dB以上となる。音源から約100 m離れた距離で漁船により発せられる騒音の周波数は100～500 Hzで音圧は127～146 dBであることが知られている (Hatakeyama, *et al.*, 1997)。これらのことからイカナゴ稚魚はこのような漁船からの騒音を感知していると考えられる。

魚の聴覚閾値は認識できる周波数と音圧を示しているが魚が音刺激に対して反応行動を示すかどうかは別に考える必要がある。行動観察では、カタクチイワシ *Engraulis japonicus* 700尾を海中に沈めた生簀に収容して100～700 Hzの音を放音したときの反応行動が報告されている (Akamatsu *et al.*, 1996)。この結果ではカタクチイワシを吃驚させて反応行動を起こす音は一番感度のよい300 Hzでも146.8 dBと一般に求められている魚類の聴覚閾値より高くなっている。このような行動実験をイカナゴ稚魚について行い、聴覚閾値と行動との関連についても調べる必要がある。

4-2 マイワシの超音波の聴覚計測

近年、魚類の資源量推定には魚群探知器が用いられるようになってきている (和田, 1994)。これに伴って魚群探知器から発せられる超音波の魚類への影響の有無も検討され始めている (Astrup and Mohl, 1993)。もし漁船や魚群探知器から発せられる騒音や超音波に反応して魚が逃避行動を起こしているとすると資源量推定が過小に評価される可能性が考えられる。魚類が魚群探知器の超音波を感知可能であれば、魚群探知器に使われている超音波の周波数の改善等が

必要になる可能性もある。

超音波感受性に関してはニシン科魚類の一部 (Mann *et al.*, 2001) とタイセイヨウタラ *Gadus morhua* (Astrup and Mohl, 1993) で、その感知が報告されている。ニシン科魚類ではアメリカンシャド *Alosa sapidissima* やガルフメンハーデン *Brevoortia patronus* 等のシャド亜科 *Alosinae* に属する魚種のみで超音波を感知できるのではないかと推測されている (Mann *et al.*, 2001 ; Higgs *et al.*, 2004)。ニシン科魚類が超音波を感知するメカニズムは最近の報告で少しずつ解明されてきている Higgs (2004)。ニシン科魚類は喉鰾類と呼ばれ、他の魚とは異なる独特の聴覚器官を持っている。内耳と隣接して聴胞器 (otic bulla) と呼ばれるガスで満ちた器官が存在し、鰾と連結しているため内耳の聴覚感度を向上させていることが知られている (川村, 安樂, 1998)。Blueback herring *Alosa aestivalis* では聴胞器の直径が2.1 mm, 共振周波数が120 -130 kHz である (Nestler *et al.*, 1992) ことが知られているが、超音波が感知できる種とそうでない種とで、この器官にある通囊の構造、形態に違いが見られることが指摘されている Higgs (2004)。一方タイセイヨウタラ *Gadus morhua* でも超音波 (38 kHz, 194.4 dB) を感知できることが報告されている (Astrup and Mohl, 1993) が、受容器に関しては鰾なのか側線なのか、別の器官なのか明らかではない (Astrup, 1999)。このように一部の魚種の超音波感受性が解ってきているが、超音波を感知できる魚種

と、その受容器の部位と種類に関しては未だ解明されていない。

イルカ類はエコーロケーションによる被食魚の探索を行う水棲動物である。したがってイルカ類に捕食される魚種では、同様に超音波を感知できるように機能が進化しても良いはずである。そこでカマイルカ *Lagenorhynchus obliquidens* に捕食されることが知られており (岩崎俊秀, 1996)、水産有用魚種であり、比較的入手が容易なマイワシ *Sardinops melanostictus* を実験対象として、その超音波の感知能力の有無を、聴性誘発反応法を用いて確かめることを試みた。

4-2-1 供試魚

実験には千葉県銚子市の近海で巻網によって漁獲された尾叉長13.8 cm ~16.4 cm のマイワシ *Sardinops melanostictus* 8尾を使用した。実験魚の尾叉長を Table 4-2-1に、写真を Fig. 4-2-1に示す。マイワシは300 Hz ~2 kHz の範囲の音を感知でき、特に1 kHz の音に感度がよいことが報告されている (Akamatsu *et al.*, 2003)。また航空機により発生する水中音を録音し、湾内の生簀に収容されたマイワシに放音すると145 dB 位から反応し始め、155 dB ではかなり顕著な逃避行動を示したことも報告されている (Hatakeyama *et al.*, 1997)。このようにマイワシでは約200 Hz ~2 kHz の可聴周波数範囲における船舶や航空機による水中騒音が及ぼす影響が検討されてきている。

Table 4-2-1. Total length of fish

No.	TL (cm)
E1	15.1
E2	16.4
E3	15.8
E4	13.9
E5	15.3
E6	16.2
E7	16.1
E8	15.9
Mean	15.9
SD	0.83

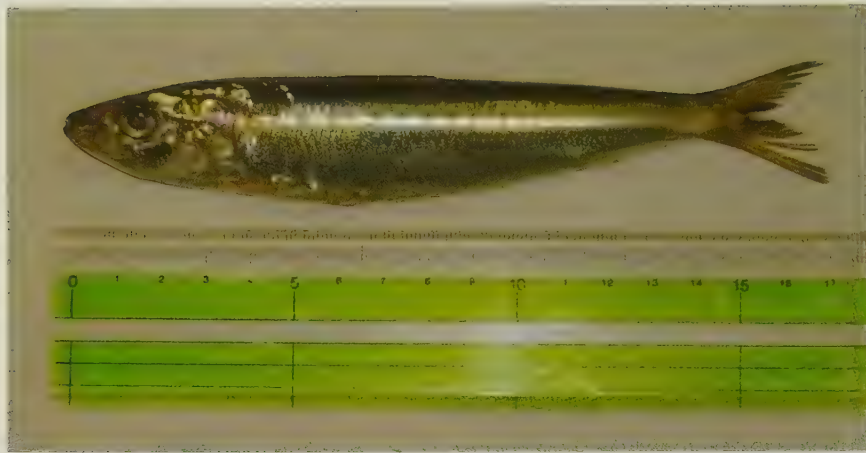


Fig. 4-2-1. Spot-lined sardine *Sardinops melanostictus*

4-2-2 実験装置および方法

マイワシは実験水槽内で固定すると4時間以上生存することがなかったという報告 (Akamatsu *et al.*, 2003) があるため、測定は4時間以内に終わらせる必要がある。心電図法では手術や、音と電気ショックによる条件付けを行う必要があるため、他魚種を用いた計測では一般的に4時間以上要することが知られている。一方、既存の聴性誘発反応を使った低周波に対するマイワシの聴覚計測では4時間以内に計測が終了できることが報告されており、この方法を用いることができる (Akamatsu *et al.*, 2003)。

実験装置の概略図を Fig. 4-2-2 に示す。イカナゴと同様な方法で海水を入れた方形ガラス水槽 (34.0 × 24.0 × 24.5 cm) に供試魚を固定した。電極の挿入、装着は第2章に示した方法と同様に行った。

超音波には40 kHz, 60 kHz, 80 kHz, 100 kHz を使用した。超音波はマルチファンクションシンセサイザー (NF1930A, エヌエフ回路設計ブロック) と任意波形発生装置 (Analogic 2020, Teknet electronics) を用いて発生させ、持続時間20 ms とし、ハニング窓関数を掛けて、減衰器 (Kenwood RA920A, Kenwood) で音圧レベルを調節しながらオーディオアンプ (Pioneer A-C3, Pioneer Electronics) で増幅した後、ハイドロホン (B&K8103, Bruel & Kjaer) から100 ms 間隔で連続的に放音した。ハイドロホンはマイワシから16 cm 水平方向に離し、水面から10 cm 沈めた位置に設置した。超音波の音圧レベルはハイドロホン (B&K8103, Bruel & Kjaer) をマイワシの頭部位置の水中に設置して計測した。ハイドロホンで受波した音圧はチャージ増幅器 (B&K2692, Bruel & Kjaer) を使って増幅し、オシロスコープ (LC334M,

LeCroy) に記録した。放音波は同位相でのみ繰り返し放音すると誘発電位導出の際に放音信号の影響を受けるため、様々に位相を変えた。

超音波が感知可能かどうかの判定は過去にニシン科魚類で聴性誘発反応を計測し、超音波が感知できていることを示した先行研究の文献 (Mann *et al.*, 2001) を参考にし、基本的には計測した反応の振幅と波形の特徴から判断した。またマイワシの感受性の良い周波数帯である1.024 kHz の音 (Akamatsu *et al.*, 2003) に対する聴性誘発反応波形と超音波に対する反応波形との比較でも反応の有無を検討した。1.024 kHz 音はオーディオソフト (Cool Edit 2000, フリーソフト) を使って5波長分のトーンバースト音を作り、同ソフトの機能を使って刺激波形の反応波形に対する影響を除去するために交互に位相を180° 反転させて200 ms 間隔で連続的に放音した。各周波数の音を聴かせて得られた波形が常に刺激音に対する応答となっているかを確かめるために同一音刺激に対して2回記録した波形でケンドールの相関係数 τ を求めた。超音波に対してはE5とE6の2尾の供試個体で、100 kHz (音圧194.1 dB) の音刺激を聴かせたときに2回記録した波形 (0.02秒間) を用いて検証した。同様に1.024 kHz (音圧128.2 dB) の音刺激に対してもE5とE6の2尾の供試個体で、反応波形 (0.005秒間) の τ を求めた。

4-2-3 実験結果

Fig. 4-2-3, Fig. 4-2-4 にE5に超音波 (40 kHz, 60 kHz, 80 kHz, 100 kHz) を放音し計測した波形を示す。アメリカンシャド *Alosa sapidissima* では40 kHz (145 dB) の刺激音で約 $5 \mu\text{V}$ の振幅, 60 kHz (145 dB) の刺激音で約 $3.5 \mu\text{V}$ の振幅, 80 kHz (145 dB)

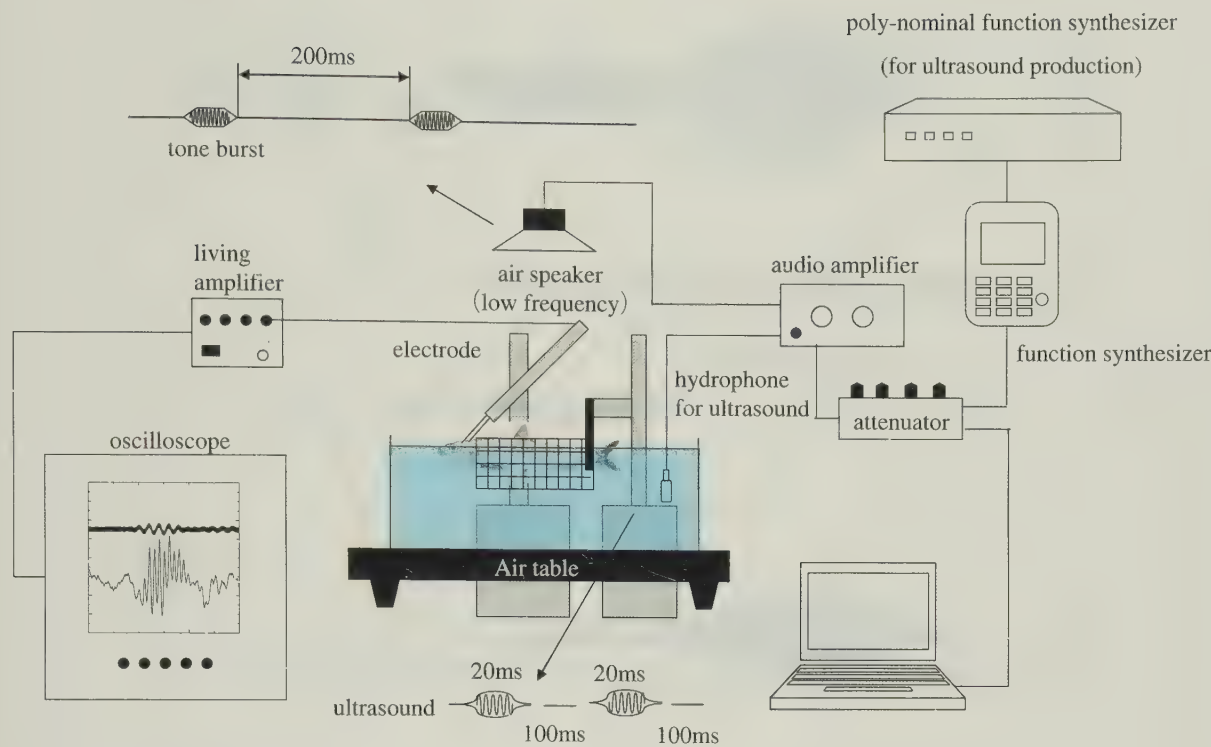


Fig. 4-2-2. Schematic diagram of the ABR recording setup.

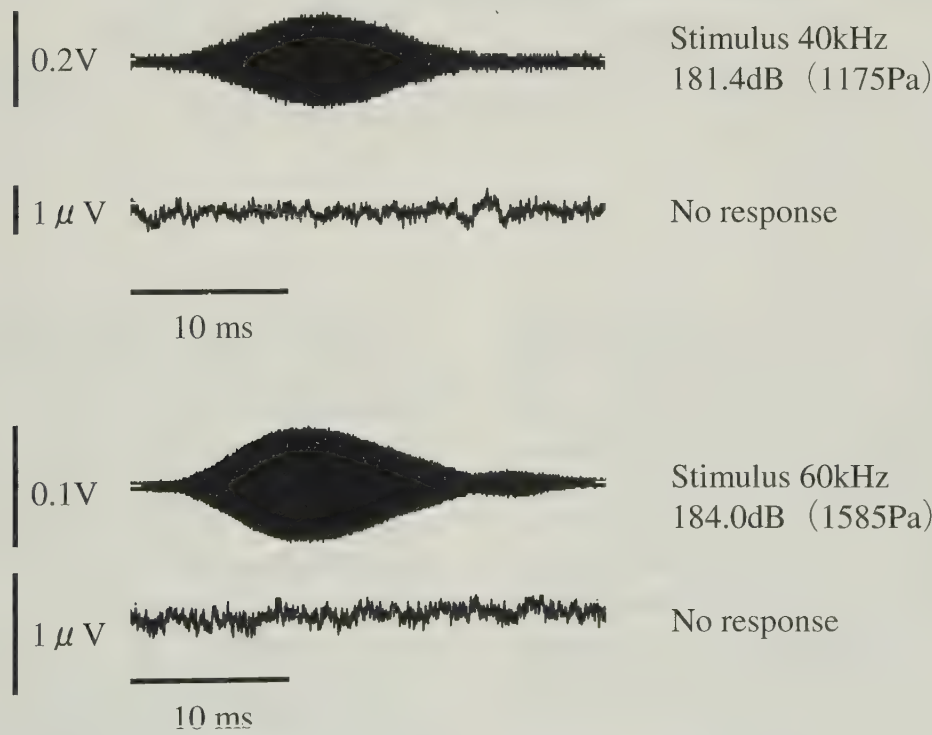


Fig. 4-2-3. No response wave to 40 kHz and 60 kHz sound stimulus (E5).

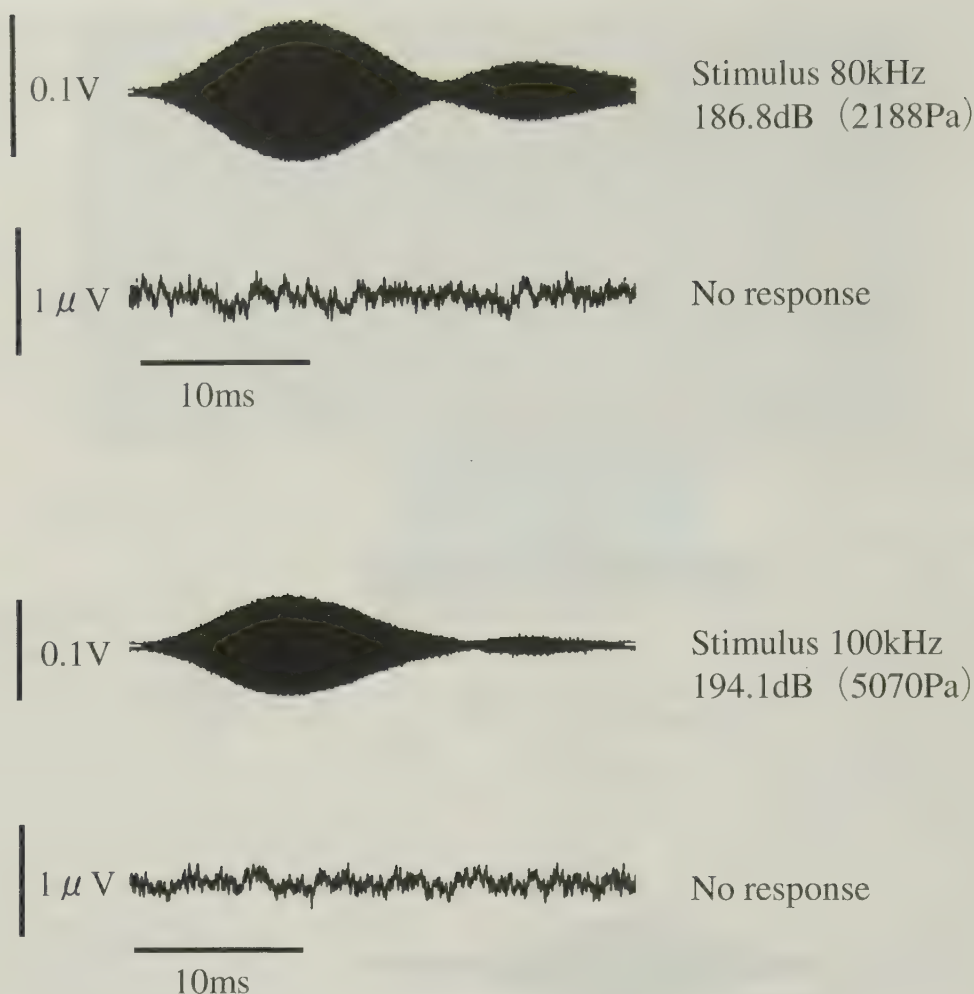


Fig. 4-2-4. No response wave to 80 kHz and 100 kHz sound stimulus (E5).

の刺激音で約 $2 \mu\text{V}$ の振幅のはっきりとした Fig. 4-2-5 に示すような V 字型 (約 10 ms 間) の反応波形が記録されることが報告されている (Mann *et al.*, 2001)。しかし本研究で超音波を聴かせて計測した波形の振幅 ($0.125 \sim 0.75 \mu\text{V}$) は先行研究で計測された波形の振幅 (約 $2 \sim 5 \mu\text{V}$) よりも小さく、反応らしき波形振幅は観られなかった。Fig. 4-2-6 に E 6 に 100 kHz, 194.1 dB の音刺激と 1.024 kHz, 128.2 dB の音刺激で同一個体で同一音に対し 2 回計測した波形を示す。100 kHz の音で記録したケンドールの相関係数 τ は E 5 で $\tau = 0.00$, E 6 で $\tau = 0.21$ となり、反応有りの基準 (Yan *et al.*, 2000) とされる 0.3 以下であった。

1.024 kHz の音を聴かせたときの典型的な反応波形は反応の始めに基線が負へ移動した後、正へ移動していた。反応振幅は最大で約 $0.62 \sim 1.75 \mu\text{V}$ の範囲にあ

った。反応波形の周波数成分はアメリカンシャド等のニシン科魚類で 600 Hz の刺激音への反応波形の特徴として刺激音周波数の 2 倍の周波数成分を持っていることが報告されているが⁸, 本研究でも刺激音の 2 倍の周波数成分である約 2 kHz の周波数成分を持つ反応波形が得られた。E 5 と E 6 の 2 尾で求めた τ (Fig. 4-2-6) は, E 5 で $\tau = 0.69$, E 6 で $\tau = 0.55$ となり, 反応の基準とされる 0.3 以上であった。

4-2-4 考察

反応波形の振幅は先行研究 (Mann *et al.*, 2001) により超音波が聴こえる魚種で計測されている反応波形の振幅よりも小さく、反応らしき波形振幅はみられなかった。また先行研究での超音波が感知できる魚種の反応波形にははっきりとした下に凸の V 字型の特徴 (Mann *et al.*, 2001) が見られるが, 本研究で

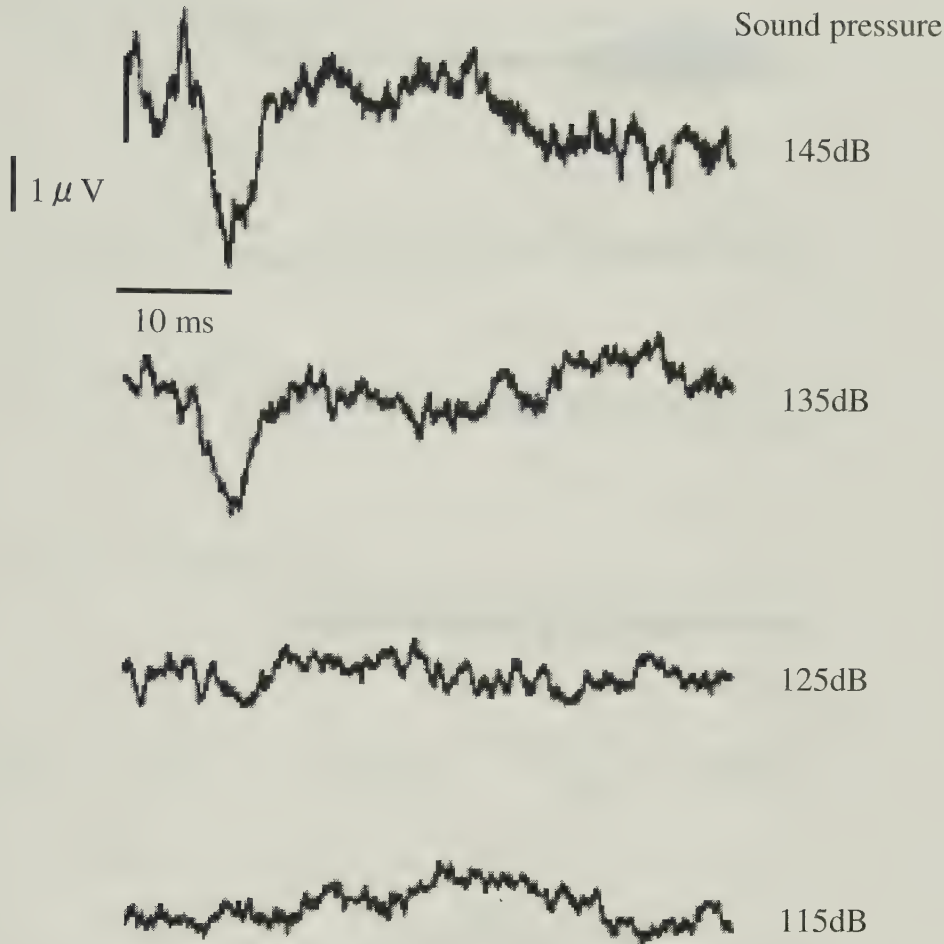


Fig. 4-2-5. ABR to 40 kHz stimulus measured from American Shad (D.A.Mann *et al* 2001).

はこのような特徴も見られなかった。また100 kHzでの記録波形でしか求めてないが、ケンドールの相関係数 τ は反応有の基準とされる0.3以下となった (Fig. 4-2-6)。このようなことからマイワシは40 kHz, 60 kHz, 80 kHz, 100 kHzの超音波を音圧約180~190 dBの範囲で感知していないと考えられる。

先行研究で得られたニシン科魚類のベイアンチョビー *Anchoa mitchilli* (Mann *et al.*, 2001) の反応波形 (音刺激600 Hz, 130 dB) と本研究での1.024 kHz (128.2 dB) の刺激音の反応波形を比較すると反応波形の周波数成分に刺激周波数の2倍周波数があることや音刺激の継続時間に対応していること、反応波形の基線の変動も同じであること等、ほぼ同じような波形の特徴を示していた。超音波が聴こえるガルフメンハーデン *Brevoortia patronus* (Mann *et al.*, 2001) の反

応波形 (音刺激600 Hz, 120 dB) とも反応開始時の振動方向の極性は反対であったが、全体的に似た特徴を持っていた。これには魚種によって反応波形の極性が様々である (Wysocki and Ladich, 2002) こと等が考えられる。

アメリカンシャドやガルフメンハーデン等のニシン科シャド亜科に属する魚は Fig. 4-2-7に示すように超音波を聴くことができることが解ってきている (Mann, *et al.*, 2001; Nestler *et al.*, 1992; Ross *et al.*, 1993)。マイワシについては本研究で用いた超音波を感知することはできなかったという結果になったが、他のニシン科魚類での計測例があることから、さらに実験個体を増やしたり、周波数、音圧を変化させた実験をすることが必要である。

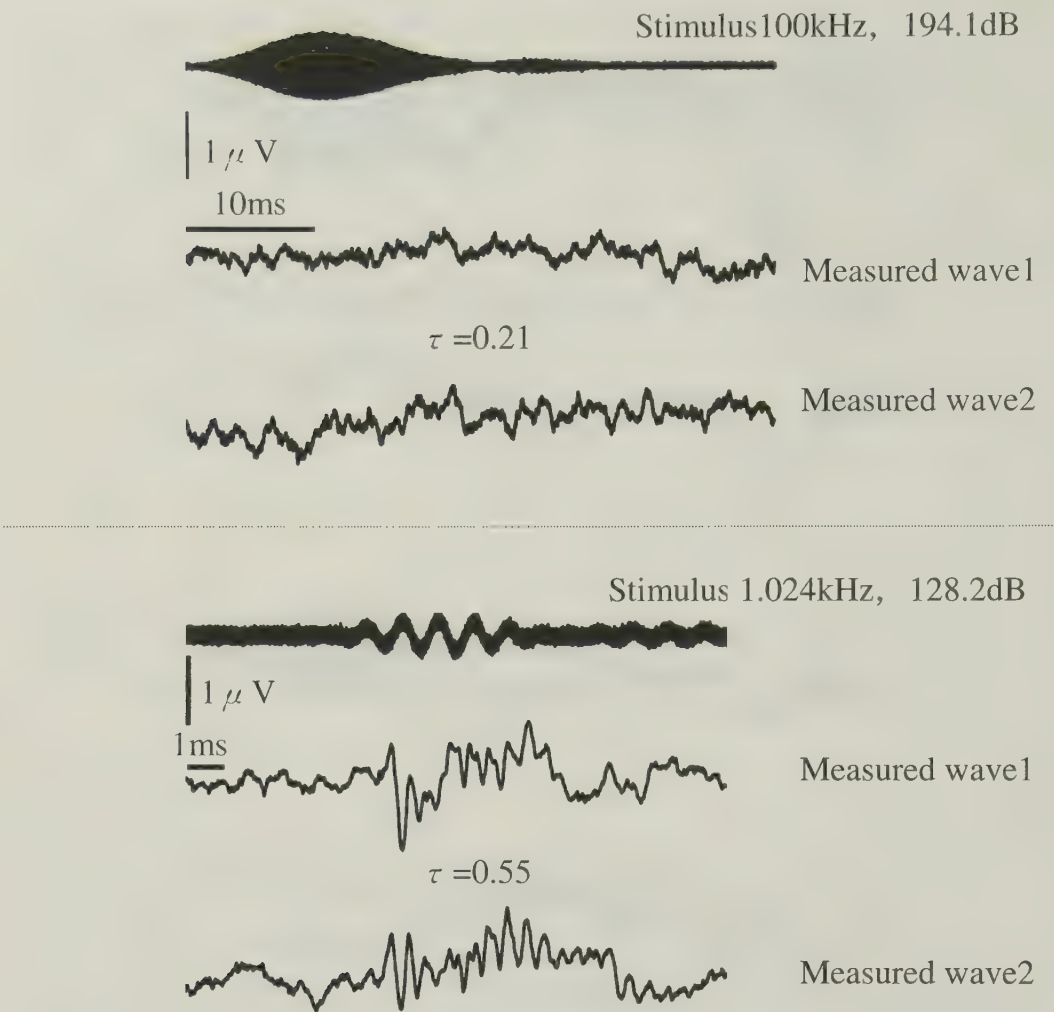


Fig. 4-2-6. Two ABR wave to stimulus 100 kHz, 194.1 dB and 1.024 kHz, 128.2 dB. Kendall correlation coefficient $\tau = 0.21$, stimulus 100 kHz, $\tau = 0.55$, stimulus 1 kHz (E6).

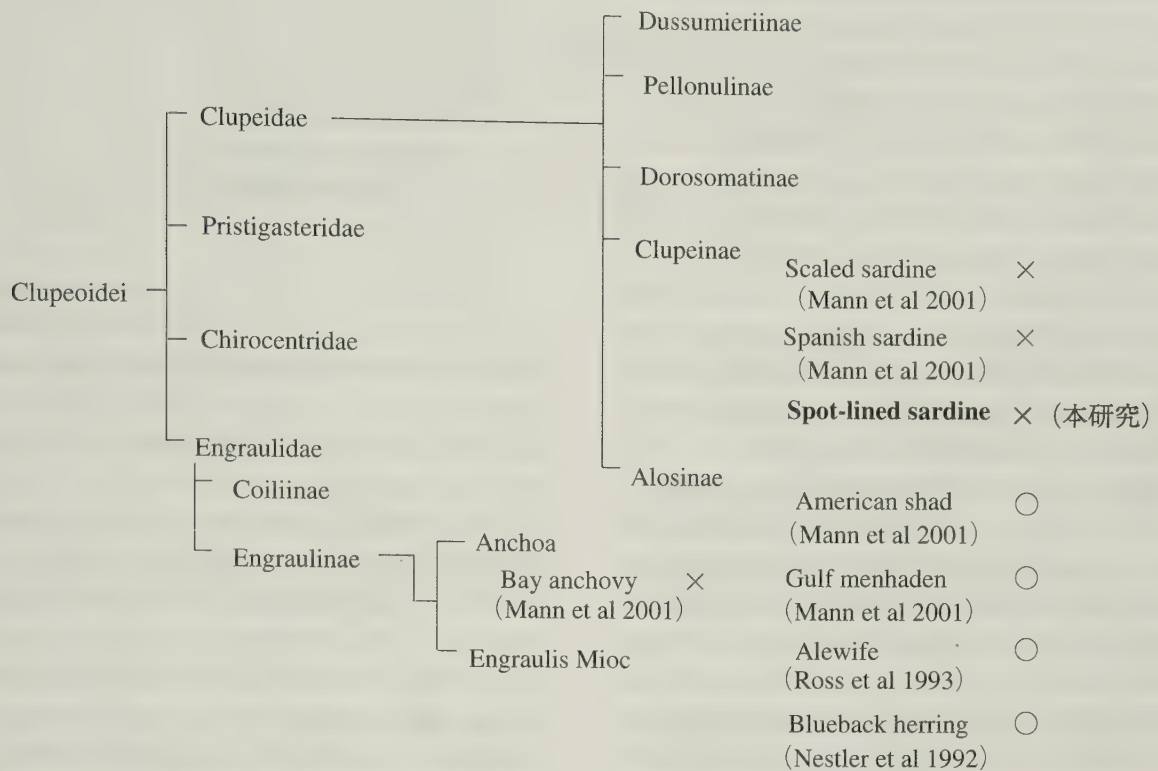


Fig. 4-2-7. A part of dendrogram of clupeiforms.
○ shows the sub family or genus that is sensitive to ultrasound.
× shows the sub family or genus that is not sensitive to ultrasound.

第5章 総合考察

聴性誘発反応法と心電図法の比較

本研究では魚類の聴覚閾値を求める方法として聴性誘発反応法に注目し、この方法の改良と応用を試み、キンギョ、イカナゴ、マイワシの聴覚特性を計測した。

本研究で用いた聴性誘発反応法は頭頂部に軽く電極をのせるのみで反応が得られ、手術が不必要、同一個体を繰り返し使える、稚魚の計測も可能といわれている (Kenyon *et al.*, 1998)。心電図法のような条件付けも必要としないため、時間もかからない。聴性誘発反応法を使ってマイワシの聴覚を計測した報告 (Akamatsu *et al.*, 2003) では4時間以内に計測が終わり、本研究でもほぼ同じ時間で計測を終了している。このような長所があるため比較的短時間で実験を終わらせる必要のある魚種では有効な方法であることがわかる。国内ではマイワシ等の長時間の実験に

耐えることのできないイワシ類は他にもいるため、そのような条件がある魚種の実験には聴性誘発反応法は有効であると考えられる。また、2つの電極をのせるだけで測定が可能であり、イカナゴのように頭部の電極を刺込む範囲の直径が数 mm の小型の魚の聴覚計測にも適用できる。

イカナゴは重要魚種でありながら今まで聴覚特性が計測されてこなかったが、聴性誘発反応法を使うことで手術の影響もなく、比較的容易に聴覚特性が計測できた。マイワシの超音波に対する聴覚特性はこれまで計測されたことはなく、本研究の結果では超音波を感知していないと考えられたが、他のニシン科の魚類についても調査し、資源量調査に使用されている魚群探知器の周波数との関連についても明らかにする必要がある。

聴性誘発反応法の課題

第2章で刺激音1 kHz の持続時間を1, 5, 10,

20 ms と変えたときの反応を計測した。持続時間が 1 ms のときは反応波形に明確な特徴は表れず、5, 10, 20 ms のときは明確に刺激周波数である 1 kHz の 2 倍の周波数成分を含んだ反応波形が計測できた Kenyon (1998) の報告によると刺激周波数によって聴性誘発反応を確実に収録するための刺激音の持続時間 (刺激音の波の数) が異なり、100~300 Hz では 2 波長分の刺激音、400 Hz~2 kHz では 5 波長、3 k~5 kHz では 8 波長であることがわかっている。本研究の結果もこの報告を支持しており、聴性誘発反応法では刺激時間の設定も重要な項目であることがわかる。また各周波数の最適な刺激音の持続時間は、より短い方がよいことも報告されている。

聴性誘発反応法等の聴覚閾値の計測方法で課題となっていることの 1 つに聴覚閾値の決定方法がある。従来の研究 (Kenyon *et al.*, 1998) でも本研究でも実験者が反応波形を観察しながら主観的に反応の有無を判定している。このため経験の有無や回数によって閾値の決定に差が生じることも考えられ、客観的な聴覚閾値決定の方法を導入する必要がある。例えば反応のある音圧から計測し始めて、反応があったら計測し終わったら自動的に次の音圧を下げた状態での計測を実行し、反応がある間は計測を継続し、ノイズに埋もれたときの音圧 (閾値) を自動的に導き出せるシステムが考えられる。この場合、1 回の計測毎に第 3 章で求めたような反応振幅とノイズ振幅の比 (S/EN 比) を計算し、S/EN 比が 1 となる直前の音圧を聴覚閾値とするなどの聴覚閾値自動計算アプリケーションソフトを作る必要もある。また、聴性誘発反応は刺激音周波数の 2 倍の周波数成分を含んだ反応が得られることが知られている (Mann *et al.*, 2001)。従って 1 回の計測毎に反応波形の FFT 解析を行い、2 倍の周波数成分のスペクトルレベルがある値を超えて含まれていたら反応有とし、含まれていなければ反応無しとする方法でも客観的な計測になると思われる。または第 4 章で求めているように同一刺激音に対する 2 つの反応波形間でケンドールの相関係数 τ を求め、 $\tau = 0.3$ 以上を反応有とすることでも客観的に計測可能であろう。さらに、各魚種で周波数毎に第 3 章で示したような反応振幅と音圧の関係を回帰直線で表し、ノイズ振幅の直線との交点を聴覚閾値とするなどの手段も考えられる。

聴覚能力指数

魚類の聴覚能力は次式の聴覚能力指数 (HI) (Schellart and Popper, 1992) で表すことができる。

$$HI = \left(\frac{f_b}{Q_{10\text{dB}}} \right)^{10} \times 10^{\frac{S_{fb}}{20}} \quad (5-1)$$

$$Q_{10\text{dB}} = \frac{fb}{f_2 - f_1}$$

fb : 最高感度周波数 (Hz),
 S_{fb} : 最小音圧閾値 (dB re 1 μ bar),
 f_1 : S_{fb} より 10 dB 大きい閾値となる低い方の周波数,
 f_2 : S_{fb} より 10 dB 大きい閾値となる高い方の周波数

この HI は受信バンド幅が広く、最小音圧閾値 S_{fb} が小さいほど大きな値をとる。このため HI が大きな魚ほど広帯域の音が聴こえ、小さい音まで聴こえることになる。HI の数値がかなり高い魚種をみるとキンメダイ目イトウダイ科のクロオビマツカサ *Myripristis kuntzei* では受信バンド幅 ($f_2 - f_1$) が 2,000 Hz、閾値 S_{fb} が -50 dB re 1 μ bar (50 dB re 1 μ Pa) で HI=14,000、ナマズ目ハマギギ科の魚 *Arius felis* では $f_2 - f_1$ が約 286 Hz、 S_{fb} が -55 dB re 1 μ bar (45 dB re 1 μ Pa) で HI=9,500 となっている。HI の数値がかなり低い魚種をみるとスズキ亜目ペルカ科のラフ *Gymnocephalus cernuus* では $f_2 - f_1$ が約 179 Hz、 S_{fb} が 12 dB re 1 μ bar (112 dB re 1 μ Pa) で HI=3.4、ネコザメ科のホーンシャーク *Heterodontus francisci* では $f_2 - f_1$ が約 19 Hz、 S_{fb} が 17 dB re 1 μ bar (117 dB re 1 μ Pa) で HI=0.61、となっており、例外を除いて HI<10 の魚種は音を利用していない。聴覚が優れている骨鰾魚 (コイ目、カラシン目、ナマズ目) の HI は 2,600~9,800 の範囲に分布している。鰾や内耳の近傍に気泡を持つ魚種と持たない魚種の合わせて 40 魚種で求められている S_{fb} 、 f_b に関して、 f_b が高いと S_{fb} が小さく、 f_b が 10 倍になると S_{fb} が約 20 dB 減少し、骨鰾魚等はそうでない魚種と比べて f_b が高く、 S_{fb} が小さく、底魚は浮魚に比べ f_b が低い傾向にあると説明されている (Schellart and Popper, 1992)。

本研究で聴覚閾値を求めた魚種の HI を Table 5-1 に示す。本研究の第 3 章で求めたキンギョ (水中、 $fb=500$ Hz、 $f_1=1,000$ Hz、 $f_2=250$ Hz、 $S_{fb}=-17.08$ dB re 1 μ bar (82.9 dB re 1 μ Pa)) の HI は HI=195.6 となり、骨鰾魚にしては小さい指数になった。本研究のキンギョの S_{fb} は -17.08 dB re 1 μ bar (82.9 dB re 1 μ Pa) であったが S_{fb} が約 10 dB 良くなる ($S_{fb}=-30$ dB re 1 μ bar (70 dB re 1 μ Pa)) と HI=866.0 となり、20 dB 良くなる ($S_{fb}=-40$ dB re 1 μ bar (60 dB re 1 μ Pa)) と HI=2,738.6 となる。HI が低くなった原因は第 3 章で述べたように水温の影響が考えられる。

Table 5-1. Auditory characteristics of 3 fish species in this experiment

Fish species	f_b (Hz)	S_{fb} (dB)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	HI
Goldfish	500	-17.1	250	1000	195.6
Japanese sand lance	181	13.3	100	400	3.8
Marbled sole	160	5.5	100	200	5.3

聴覚特性と生態との関連

実験で使った各魚種の聴覚閾値を使って、聴覚能力指数 HI を計算するとイカナゴ ($f_b=181$ Hz, $f_1=400$ Hz, $f_2=100$, $S_{fb}=13.26$), マコガレイ ($f_b=160$ Hz, $f_1=200$ Hz, $f_2=100$, $S_{fb}=5.58$) の HI はそれぞれ, HI=3.76 (イカナゴ), HI=5.26 (マコガレイ) となった (Table 5-1)。イカナゴとマコガレイの HI は $HI < 10$ となり、音を利用していない部類の魚種になると思われる。聴覚閾値曲線もキンギョと比較して高くなっている。イカナゴは夏期には海水温が約 20℃ 以上になると砂の中に潜って動かなくなる (夏眠) 行動をすることが知られている (柳橋, 船越, 1997)。夏眠中のイカナゴは摂餌をせず, 夏眠中に成熟する。イカナゴが夏眠という特異な生態をもつに至った理由は代謝上の問題と食害による減耗回避という再生産上の問題が考えられている (柳橋, 船越, 1997)。このような環境では聴覚は余り必要ではなくイカナゴは夏眠行動で砂中に潜るようになって、聴覚を利用しなくなったとも考えられる。マコガレイも潜砂行動をすることから、稚魚では潜砂能力の試験が行われている (Tanda, 1990)。ツノガレイ *Pleuronectes platessa* の稚魚では砂に潜ることでボラック *Pollachius pollachius* からの捕食を回避できるとの報告がある (Ansell and Gibson, 1993)。マコガレイもイカナゴ同様、潜砂行動をすることで聴覚を利用しなくなったことが考えられる。骨鰯魚であるキンギョは淡水で生活している。キンギョの聴覚閾値が低く、敏感な周波数範囲が広い理由はヒトでもいわれるように淡水の方が海水より静かであること、淡水は音が減衰しないで良く伝わること等が考えられる (Ladich, 1999)。

イカナゴ、マコガレイの聴覚は 1 kHz 以下の周波数の音に感度が良く、遠方の音も感知していることが解った。しかし音を感知していることとそれに応じて行動を起こすこととは直接結びつくとは限らない。危険が近づいていると解るような捕食生物の遊泳音や、餌の所在が解るような音、繁殖と関係のある音では生物に備わった反射行動を起こすと考えられるが、それ以

外の音への反応は定まっていないと考えられる。また何回か漁船に遭遇することで漁船の音を学習して逃避行動を起こすようになる可能性も考えられる。このように音は魚類の行動と密接に係わっており、魚類の聴覚特性を知ることで反応行動を解析し、行動を制御する方法を見い出すことも可能となる。

魚類の生棲する環境には様々な音が存在しており聴覚閾値の最も低い周波数とその魚種にとってどのような利点があるのか、どのような周波数を人間が利用可能か等、解明すべき点は多くある。このためには幼稚魚からマグロ等の高速遊泳魚まで広い範囲の魚種の聴覚特性の計測が必要であり、聴性誘発反応法は現在用いられている手法では最適である。したがって、電極の材質、寸法、取り付け方法を改善するとともに閾値判定をより客観的に判定できるシステムを確立することが必要となる。

謝 辞

本論文の作成にあたり御指導を賜った北海道大学大学院水産科学研究院行動資源計測学領域 平石智徳准教授に謝意を表す。主査をしていただいた北海道大学大学院水産科学研究院衛星資源計測学領域 齊藤誠一教授、副査をしていただいた同研究院音響資源計測学領域 飯田浩二教授に謝意を表す。北海道大学大学院山本勝太郎名誉教授には実験の遂行に御協力頂いたことに感謝する。実験の御指導と貴重な御助言を賜った水産工学研究所赤松友成主任研究員、高尾芳三研究室長をはじめとする水産工学研究所の研究者、職員の方々に深く感謝する。また実験に御協力頂き、実験器具等に関する情報を提供して頂いた北海道大学院水産科学研究院 金成勲氏をはじめとする大学院生ならびに卒業生に感謝の意を表する。

文 献

- 1) 阿部晴子, 1976: 魚類聴覚の特性に関する基礎的研究. 東京大学大学院農学系研究科水産学博士論

- 文.
- 2) Akamatsu, T., Matsushita, Y., Hatakeyama, Y. and Inoue, Y., 1996 : Startle response level of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* to underwater pure tone signals. *Fish. Sci.*, **62**, 648-649.
- 3) Akamatsu, T., Nanami, A. and Yan, H. Y., 2003 : Spotlined sardine *Sardinops melanostictus* listens to 1-kHz sound by using its gas bladder. *Fish. Sci.*, **69**, 348-354.
- 4) Anraku, K., Matsuda, M., Nakahara, M., Shigesato, N. and Kawamura, G., 1997 : Sound learned by red sea bream conditioned to intermittent 300 Hz sound. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **6**, 934-938.
- 5) Anraku, K., Matsuda, M., Nakahara, M., Shigesato, N. and Kawamura, G., 1998 : Flounder show conditioned response to 200-800 Hz tone-bursts despite their conditioning to 300 Hz tone-burst. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **64**, 755-758.
- 6) 安楽和彦, 1998 : コイ (*Cyprinus carpio*) の聴覚側線機能に関する電気生理学的研究. 北海道大学博士論文.
- 7) Ansell, A. D. and Gibson, R. N., 1993 : The effect of sand and light on predation of juvenile plaice (*Pleuronectes platessa*) by fishes and crustaceans. *J. Fish. Biol.*, **43**, 837-845.
- 8) Astrup, J. and Mohl, B., 1993 : Detection of intense ultrasound by the cod *GADUS MORHUA*. *J. Exp. Biol.*, **182**, 71-80.
- 9) Astrup, J., 1999 : Ultrasound detection in fish - a parallel to the sonar - mediated detection of bats by ultrasound - sensitive insects?. *Comp. biochem. physiol. A*, **124**, 19-27.
- 10) Au, W. W. L., 1993 : The Sonar of Dolphins, Springer-Verlag, New York.
- 11) Casper, B. M. and Mann, D. A., 2007 : Dipole hearing measurements in elasmobranch fishes. *J. Exp. Biol.*, **210**, 75-81.
- 12) Chapman, C. J., 1973 : Field studies of hearing in teleost fish. *Helgolander wiss Meeresunters.*, **24**, 371-390.
- 13) Chapman, C. J. and Hawkins, A. D., 1973 : A field study of hearing in the cod, *Gadus morhua*. *L. J. Comp. Physiol.*, **85**, 147-167.
- 14) Chapman, C. J. and Sand, O., 1974 : Field studies of hearing in two species of flatfish *Pleuronectes Platessa* and *Limanda Limanda*. *Comp. Biochem. Physiol.*, **47A**, 371-385.
- 15) Corwin, J. T., 1981 : Audition in elasmobranchs, in "Hearing and Sound Communication in Fish" (ed. by Tavolga, W. N., Popper, A. N. and Fay, R. R.), Springer Verlag, New York, Heidenberg, Berlin, pp. 81-105.
- 16) デルコミン, 1999 : ニューロンの生物学 (小倉明彦, 富永恵子訳), 南江堂, 東京.
- 17) Enger, S. A. and Mann, D. A., 2005 : Auditory sensitivity of sergeant major damselfish *Abudefduf saxatilis* from post-settlement juvenile to adult. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **285**, 213-222.
- 18) 藤枝 繁, 松野保久, 山中有一, 鄭 龍晋, 1994 : ゼロクロッシング法による魚群遊泳音の周期解析. 日水誌, **60**, 201-205.
- 19) Funakoshi, S., 1998 : Studies on the mechanisms behind the species replacement between sardine and anchovy populations and the ecology of sand eel for the management of fishery resources. *Bull. Jpn. Soc. Fish. Oceanogr.*, **62**, 218-234.
- 20) 船坂宗太郎, 2000 : 聴性脳幹反応とは. 必携聴性脳幹反応ガイドブック, (船坂宗太郎監修; 橋本勲, 矢野純編), メジカルビュー社, 東京, pp. 2-7.
- 21) 古河太郎, 1977 : 聴覚, 「魚類生理」(川本信之編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 491-512.
- 22) Harris, G. G., 1964 : Considerations on the physics of sound production by fishes, in "Marine Bio-Acoustics" (ed by Tavolga, W. N.), Vol. 1, Pergamon, Oxford, pp. 233-247.
- 23) Hashimoto, H., 1984 : Population structure of the sandeel around Japan. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **50**, 1357-1365.
- 24) Hatakeyama, Y., Inoue, Y., Takei, T., Sakaguchi, S., Fujii, K., Ikeda, A. and Kitagawa, T., 1997 : Effect of Underwater Sounds on Fish. *Japan. Fisheries Resource Conservation Ass.*, Tokyo, **47**, pp. 39-48.
- 25) Hawkins, A. D. and Maclellan, D. N., 1975 : An acoustic tank for hearing studies on fish, "in Sound reception in fish", (ed by Schuijf, A and Hawkins, A. D.), Elsevier Scientific Pub. Co, Amsterdam New York, pp. 149-169.

- 26) Higgs, D. M., Plachta, D. T. T., Rollo, A. K., Singheiser, M., Hastings, M. C. and Popper, A. N., 2004 : Development ultrasound detection in American shad *Alosa sapidissima*. *J. Exp. Biol.*, **207**, 155-163.
- 27) 石居 進, 1975 : 生物統計学入門, 培風館, 東京.
- 28) Ishioka, H., Hatakeyama, Y. and Sakaguchi, S., 1988 : The hearing ability of the red sea bream *Pagrus major*. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **54**, 947-951.
- 29) 板沢靖男, 1970 : 魚類生理, (川本信之編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 60-63.
- 30) 板沢靖男, 1991 : 魚類生理学, (板沢靖男, 羽生功編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 1-4.
- 31) 伊藤博信, 吉本正美, 1991 : 魚類生理学, 板沢靖男, 羽生 功編, 恒星社厚生閣, 東京, pp. 381-383.
- 32) 岩崎俊秀, 1996 : カマイルカ, 日本動物大百科哺乳類Ⅱ, (日高敏隆監修; 伊沢紘生, 粕谷俊雄, 川道武男編), 平凡社, 東京.
- 33) Jewett, D. L., Romano, M. N. and Williston, J. S., 1970 : Human auditory evoked potentials : possible brain stem components detected on the scalp. *Science*, **167**, 1517-1518.
- 34) 加我君孝, 1987-1988 : 聴性脳幹反応の臨床応用. *Clinical Neuroscience*, **5**, 883-892.
- 35) 加我君孝, 1998 : ヒトと動物の波形と起源. ABRハンドブック, (加我君孝編), 金原出版, 東京, pp. 9-13.
- 36) 川村軍蔵, 安樂和彦, 1998 : 魚類の聴側線器の構造と機能, 「魚類の聴覚生理」(添田秀男, 畠山良己, 川村軍蔵編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 1-62.
- 37) Kenyon, T. N., Ladich, F. and Yan, H. Y., 1998 : A comparative study of hearing ability in fishes : the auditory brainstem response approach. *J. Comp. Physiol.*, **182**, 307-318.
- 38) Kojima, T., Shimamura, T., Yoza, K., Okumoto, N., Hatakeyama, Y. and Soeda, H., 1992 : W-shaped auditory threshold curves of masu salmon *Onchorhynchus masou*. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **58**, 1447-1452.
- 39) Kojima, T., Ito, H., Komada, T., Taniuch, T. and Akamatsu T., 2005 : Measurements of auditory sensitivity in common carp *Cyprinus carpio* by the auditory brainstem response technique and cardiac conditioning method. *Fish. Sci.*, **71**, 95-100.
- 40) Kudo, Y., Satou, M., Kitamura, S., Iwata, M. and Takeuchi, Y., 1997 : Underwater radio telemetry of electroencephalographic activity from the hime salmon, landlocked sockeye salmon *Onchorhynchus nerka*. *Fish. Sci.*, **63**, 687-691.
- 41) Ladich, F., 1999 : Did auditory sensitivity and vocalization evolve independently in otophysan fishes? *Brain. Behav. Evol.*, **53**, 288-304.
- 42) Ladich, F. and Yan, H. Y., 1998 : Correlation between auditory sensitivity and vocalization in anabantoid fishes. *J. Comp. Physiol. A*, **182**, 737-746.
- 43) Ladich, F. and Wysocki, L. E., 2003 : How does tripus extirpation affect auditory sensitivity in goldfish?. *Hearing. Res.*, **182**, 119-129.
- 44) 李 遺元, 向井 徹, 飯田浩二, 2000 : スキャニングソナーを用いた船舶の接近に対する魚群行動の評価法. 日水誌, **66**, 825-832.
- 45) Lovell, J. M., Findlay, M. M., Nedwell, J. R. and Pegg, M. A., 2005 : The inner ear morphology and hearing abilities of the Paddlefish (*Polyodon spathula*) and the Lake Sturgeon (*Acipenser fulvescens*). *Comp. Biochem. Physiol. A*, **142**, 286-296.
- 46) Lovell, J. M., Findlay, M. M., Nedwell, J. R. and Pegg, M. A., 2006 : The hearing abilities of the silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and bighead carp (*Aristichthys nobilis*). *Comp. Biochem. Physiol. A*, **143**, 286-291.
- 47) Lu, Z., Xu, Z. and Buchser, W. J., 2003 : Acoustic response properties of lagena nerve fibers in the sleeper goby, *Dormitator latifrons*. *J. Comp. Physiol. A*, **189**, 889-905.
- 48) Lu, Z., Xu, Z. and Buchser, W. J., 2004 : Coding of acoustic particle motion by utricular fibers in the sleeper goby, *Dormitator latifrons*. *J. Comp. Physiol. A*, **190**, 923-938.
- 49) Malene, S., Magnus, W., Fernando, U. and Lee, A. M., 2005 : Acoustic characteristics of underwater tail slaps used by Norwegian and Icelandic killer whales (*Orcinus orca*) to debilitate herring (*Clupea harengus*). *J. Exp. Biol.*, **208**, 2459-2466.
- 50) 間庭愛信, 1984 : 海中生物の鳴音の例と水中音に対する反応の実験と実用例. 月刊 海洋科学, **16**, 285-290.

- 51) Mann, D. A., Lu, Z. and Popper, A. N., 1997 : A clupeid fish can detect ultrasound. *Nature.*, **389**, 341.
- 52) Mann, D. A., Higgs, D. M., Tavalga, W. N., Souza, M. J. and Popper, A. N., 2001 : Ultrasound detection by clupeiform fishes. *J. Acoust. Soc. Am.*, **109**, 3048-3054.
- 53) Motomatsu, K., Hiraishi, T., Yamamoto, K. and Nashimoto, K., 1996 : Auditory threshold and critical ratio of black rock fish *Sebastes schlegeli*. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **62**, 785-790.
- 54) 永島 宏, 2001 : 宮城県におけるイカナゴ漁業の全国位置と課題. 宮城県水産研究開発センター研究報告, **16**, 3-19.
- 55) Nestler, J. M., Ploskey, G. R. and Pickens, J., 1992 : Responses of blueback herring to high-frequency sound and implications for reducing entrainment at hydropower dams. *North Am. J. fish. Manage.*, **12**, 667-683.
- 56) 小田洋一, 2004 : 後脳の分節構造に基づいたニューロン回路の機能構築. 蛋白質 核酸 酵素, **49**, 486-492.
- 57) Parvulescu, A., 1966 : The acoustics of small tanks, in "Marine Bio Acoustics", (ed by Tavalga, W. N.), Vol. 2, Pergamon, Oxford, pp. 7-13.
- 58) Popper, A. N., 1972a : Auditory threshold in the goldfish (*Carassius auratus*) as a function of signal duration. *J. Acoust. Soc. Am.*, **52**, 596-602.
- 59) Popper, A. N., 1972b : Pure-tone auditory thresholds for the carp (*Cyprinus carpio*). *J. Acoust. Soc. Am.*, **52**, 1714-1717.
- 60) Ross, Q. E., Dunning, D. J., Thorne, R., Menezes, J. K., Tiller, G. W. and Watson, J. K., 1993 : Response of alewives to high-frequency sound at a power plant intake on Lake Ontario. *North Am. J. fish. Manage.*, **13**, 291-303.
- 61) 佐藤真彦, 上田一夫, 1984 : 魚類, 「実験生物学講座」(杉 晴夫, 平本幸男編), 丸善, 東京, pp. 299-312.
- 62) Sawa, M., 1976 : The audiogram of the goldfish determined by a heart rate conditioning method. *Bull. Fac. Fish. Hokkaido. Univ* (北海道大学水産学部研究彙報), **27**, 129-136.
- 63) Schellart, N. A. M. and Popper, A. N., 1992 : Functional aspects of the evolution of the auditory system of actinopterygian fish, "in The Evolution Biology of Hearing" (ed by Webster, D. B., Fay, R. R. and Popper, A. N.), Springer-Verlag, New York, Tokyo, pp. 295-322.
- 64) Scholik, A. R. and Yan, H. Y., 2002 : The effects of noise on the auditory sensitivity of the bluegill sunfish, *Lepomis macrochirus*. *Comp. Biochem. Physiol.*, **133A**, 43-52.
- 65) 関沢泰治, 1981 : 実験動物としての魚類, (江上信雄編), ソフトサイエンス社, 東京, pp. 174-188.
- 66) Shimozawa, T. and Kanou, M., 1984 : The aerodynamics and sensory physiology of range fractionation in the cercal filiform sensilla of the cricket *Gryllus bimaculatus*. *J. Comp. Physiol. A.*, **155**, 495-505.
- 67) 下澤楯夫, 加納正道, 1987 : 流れの感覚. 動物生理, **4**, 83-89.
- 68) Suga, T., Kawabe, R., Hiraishi, T. and Nashimoto, K., 2004 : Sound pressure values in the audiogram of marbled sole *Pleuronectes yokohamae* measured in air. *Fish. Sci.*, **70**, 33-40.
- 69) Suga, T., Akamatsu, T., Sawada, K., Hashimoto, H., Kawabe, R., Hiraishi, T. and Yamamoto, K., 2005 : Audiogram measurement based on the auditory brainstem response for juvenile Japanese sand lance *Ammodytes personatus*. *Fish. Sci.*, **71**, 287-292.
- 70) Suga, T., Akamatsu, T., Kawabe, R., Hiraishi, T. and Yamamoto, K., 2005 : Method for underwater measurement of the auditory brainstem response of fish. *Fish. Sci.*, **71**, 1115-1119.
- 71) Suga, T., Akamatsu, T., Hiraishi, T. and Yamamoto, K., 2006 : Contamination of auditory evoked potential of goldfish *Carassius auratus* with microphonic potential. *J. Marine. Acoust. Soc. Jpn.*, **33**, 13-16.
- 72) 高尾芳三, 1994 : スケトウダラの音響資源調査. 月刊海洋, **26**, 660-665.
- 73) 竹村 陽, 1984 : 魚類の遊泳音, 「海洋の生物過程」(丸茂隆三編), 恒社厚生閣, 東京, pp. 194-197.
- 74) Tanda, M., 1990 : Studies on ability in sand and selection to the grain size for hatchery-reared marbled sole and Japanese flounder. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **56**, 1543-1548.
- 75) Urick, R. J., 1972 : Noise Signature of Aircraft in

- Level Flight over a Hydrophone in the sea. *J. Acoust. Soc. Am.*, **52**, 993-999.
- 76) 和田時夫, 1994 : マイワシの音響資源調査. 月刊海洋, **26**, 653-656.
- 77) 渡辺和博, 大塚 修, 平野正人, 1990 : 底生魚類を対象とする海底牧場造成技術の研究. 新潟栽培漁業センター平成元年度業務研究報告書, **14**, 54-58.
- 78) Wenz, G. M., 1962 : Acoustic ambient noise in the ocean : Spectra and sources. *J. Acoust. Soc. Am.*, **34**, 1936-1956.
- 79) Wysocki, L. E. and Ladich, F., 2002 : Can fishes resolve temporal characteristics of sounds? New insights using auditory brainstem responses. *Hear. Res.*, **169**, 36-46.
- 80) Wysocki, L. E. and Ladich, F., 2003 : The representation of conspecific sounds in the auditory brainstem of teleost fishes. *J. Exp. Biol.*, **206**, 2229-2240.
- 81) Yamakawa, M., Ikeda, F. and Hatakeyama Y., 1998 : Auditory characteristics of rainbow trout *Onchorynchus mikiss*. Tokyo-To Suisan Shikenjo Chosa Kenkyu Hokoku., **210**, 21-35.
- 82) Yamashita, Y., Kitagawa, D. and Aoyama, T., 1985 : Diel vertical migration and feeding rhythm of the larvae of the Japanese sand-eel *Ammodytes personatus*. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, **51**, 1-5.
- 83) Yan, H. Y., Fine, M. L., Horn, N. S. and Colon, W. E., 2000 : Variability in the role of the gas-bladder in fish audition. *J. Comp. Physiol. A.*, **186**, 435-445.
- 84) 柳橋茂昭, 船越茂雄, 向井良吉, 中村元彦, 1997 : 伊勢湾産イカナゴの夏眠期における生き残りと成熟, 産卵機構. 愛知水試研報告, **4**, 23-31.
- 85) 安沢 弥, 関 泰夫, 池田 徹, 本間智晴, 渡辺誠治, 1995 : 底生魚類を対象とする海洋牧場造成技術の研究. 新潟栽培漁業センター平成五年度業務研究報告書, **18**, 39-41.
- 86) Yong-Seok, Park., Iida, K., Mukai, T. and Sakurai, Y., 1995 : Auditory characteristics of walleye Pollock *Theragra chalcogramma* (Pallas). *Nippon Suisan Gakkaishi*, **61**, 159-163.
- 87) Yoshimura, Y. and Koyanagi, Y., 2004 : Design of a small fisheries research vessel with low level of underwater-radiated noise. *J. Marine Acoust. Soc. Jpn.*, **31**, Jul, 1-9.
- 88) Zhang, G., Hiraishi, T., K, Motomatsu., and Nashimoto, K., 1998 : Auditory threshold of marbled sole *Pleuronectes yokohamae*. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **64**, 211-215.

和文要旨

東シナ海産クロエソ *Saurida umeyoshii* および対馬海峡産トカゲエソ *Saurida elongata* の資源生物学的研究

酒井 猛（西海区水産研究所）

クロエソ、トカゲエソを含むエソ類は我が国各地の沿岸、東シナ海等で漁獲され、高級練り製品の原料となる水産重要種である。しかしながら、我が国周辺のエソ類についてはかつて分類学的混乱があり、資源管理に必要な生物学的知見の整備は立ち後れていた。本研究では、分類学的にマエソと混同されていたクロエソ、コウカイトカゲエソと混同されていたトカゲエソの2種について年齢、成長および成熟、産卵に関する資源生物学的特性を解明した。

第1章：1998年4月から2000年4月に東シナ海で漁獲されたクロエソ計1,052個体を用いた。耳石最外縁部における透明帯の出現率および縁辺成長率の月別変化から、標示は年1回、12～3月に形成されると考えられた。

雌雄の成長式は次式により示された。

雄: $FL_t = 421.7 (1 - e^{-0.162 (t + 1.24)}) (1 \leq t \leq 8)$

雌: $FL_t = 489.4 (1 - e^{-0.160 (t + 0.95)}) (1 \leq t \leq 10)$

これらの成長推定結果より、雌は雄に比べ寿命が長く、成長も良いと考えられた。寿命は、雄で8歳、雌で10歳程度と考えられた。また、過去に行われた鱗によるエソ類の年齢査定は年齢を過小評価していた可能性が示唆された。

第2章：1998年4月から2000年4月にかけて東シナ海で漁獲されたクロエソ計1,052個体を用いた。組織学的観察に基づき、卵巣の成熟段階を未成熟期、発達期、成熟期、産卵期、閉鎖期、休止期の6期に区分した。成熟期あるいは産卵期の卵巣を持った個体は4～12月で認められ、特に6～9月にかけて高い頻度で出現した。雌のGSIは6～9月にかけて高く、8月には最大値を示した。雄では6月に最大値を示した。これらのことから、本種の産卵期間は6～9月を盛期として、4～12月の長期にわたると考えられた。最小成熟尾叉長は雄180 mm、雌228 mmであった。時間帯別の卵径組成および卵巣の組織観察より、本種では産卵直前に卵径600～700 μm の卵黄形成後期から胚胞移動前期の卵で構成されるピークが形成され、そのピークからいくつかの分離卵群が形成されるという産卵様式を持つと考えられた。さらに、この分離卵群は早い間隔で成熟、排卵が進行していき、クロエソは一度産卵が始まると数日間連続して産卵することが示唆された。また、この一連の産卵が終わると、卵黄形成後期の卵が発達することによって再び卵径600～700 μm

のピークが形成され、同様に一連の産卵を繰り返すと考えられた。バッチ産卵数(BF粒)と尾叉長の関係は、

$BF = 1.70 \times 10^{-8} FL^{4.88} (r^2 = 0.49)$

で示された。

第3章：1999年5月から2001年6月にかけて対馬海峡周辺海域で漁獲されたトカゲエソ計695個体を用いた。鱗と耳石で輪紋の読み取り精度を比較した結果、鱗の輪紋数は耳石に比べ著しく少なく、鱗による年齢査定は年齢を過小評価すると考えられた。また耳石による読み取り精度が鱗による精度を上回った。耳石最外縁部における透明帯の出現率および縁辺成長率の月別変化から、標示は年1回、11～2月に形成されると考えられた。

雌雄の成長式は次式により示された。

雄: $FL_t = 422.3 (1 - e^{-0.202 (t + 1.30)}) (1 \leq t \leq 10)$

雌: $FL_t = 512.6 (1 - e^{-0.157 (t + 1.45)}) (1 \leq t \leq 11)$

これらの成長推定結果より、雌は雄に比べ成長も良いと考えられた。寿命は、雄で10歳、雌で11歳程度と考えられた。また、過去に行われた鱗によるエソ類の年齢査定は年齢を過小評価していた可能性が示唆された。

第4章：1999年5月から2001年6月にかけて対馬海峡周辺海域で漁獲されたトカゲエソ計695個体を用いた。組織学的観察に基づき、卵巣の成熟段階を未成熟期、発達期、成熟期、産卵期、閉鎖期、休止期の6期に区分した。成熟期あるいは産卵期の卵巣を持った個体は5～8月で認められ、特に5、6月に高い頻度で出現した。雌のGSIは4～8月にかけて高く、5月には最大値を示した。雄でも5月に最大値を示した。これらのことから、本種の産卵期間は5、6月を盛期として、5～8月にわたると考えられた。最小成熟尾叉長は雄235 mm、雌249 mmであった。バッチ産卵数(BF粒)と尾叉長の関係は、

$BF = 0.00161 FL^{2.98} (r^2 = 0.73)$

で示された。

No. 28, 1-45 (2009)

イルカのソーナー能力の魚群探知機への適用に関する研究

今泉智人（水産工学研究所）

水産資源の持続的管理・利用が求められており、そのための水産資源調査に計量魚群探知機を用いた音響資源量調査が現在広く行われている。音響を用いた資源量調査は、広範囲の資源量を直接迅速に推定できる強力な方法である。しかし、未だ音響手法のみで魚種

を識別することが難しいこと、自然状態の魚の反射強度などの基礎情報の計測において、疎な分布にしか適用できないことなど、問題点も残されている。一方で、イルカは、エコーロケーションと呼ばれるソーナー能力を有しており、自身の発した超音波を利用して、対象までの距離、対象の大きさ、材質などの情報を得ている。イルカの主な対象も魚であることから、このようなイルカのソーナー能力を人工のソーナーに応用することが出来れば、音響を用いた資源量調査や水産用音響機器の大幅なレベルアップが期待される。

そこで、本研究では、イルカのソーナー能力を魚群探知機に適用することを目的として、研究を行った。特に本研究では、イルカのソーナー音の短パルスかつ広帯域という特長に焦点を当て、そのソーナー音を送受して、対象に固有の反射（反射強度）の周波数特性（TS スペクトル）を計測できるようにし、魚種識別や行動推定に道を開く。

まず、イルカのソーナー音を用いた TS スペクトルの計測システムを構築し、反射波と入射波のスペクトルの比で TS スペクトルを求める計測方法（スペクトル比法）を、反射特性明確な金属球により検証した。金属球の散乱特性は、理論計算により求めることができ、戻り反射に指向性がないので都合が良い。水槽において金属球の広帯域での散乱特性を計測し、この理論値と比較し、よく一致することを確認した。したがって、以降、広帯域で精確な魚の散乱特性の測定が、構築したシステムとスペクトル比法を用いて実現できる。

次に、麻酔をかけたマアジ、マダイ、マサバの背方向の TS スペクトルを、イルカのソーナー音を用いて水槽で測定した。また 1 尾のマダイの姿勢角を変化させ、TS スペクトルの測定を行った。その結果、魚の TS スペクトルは、魚種、姿勢角、個体によりかなり大きく異なるが、その値は既往の研究と同じ傾向であった。

次に、海上で自然状態に近い魚の TS スペクトルを測定した。海では送受波器と対象の魚の位置関係が確認できないため、送受波器の指向性の影響を受け、精確な TS スペクトルを得ることは難しい。そこで、金属球を魚の近傍に吊るしそのエコーで指向性関数の補正を行った。その結果、活発に泳いでいるイサキの姿勢角変化による TS スペクトルの変動を計測できた。このような姿勢変動を含んだ TS スペクトルの連続的な測定が、魚種推定のための情報量増加に資すると考えられる。また、イルカのパルス幅が短い広帯域の音波を用いることで、高い距離分解能を実現することができ、自然状態の魚の群れを分解して、単体の集まり

として認識できた。

海上実験で問題となった指向性関数補正のために、広帯域の音波を送受信可能なスプリットビーム（以下 SB）方式を採用したシステム（広帯域 SB システム）を試作した。SB 方式では、受波器を分割して、対象からの反射波の到達時間差を用いて、送受波器から見た相対的な対象の方位と位置を測定できる。広帯域の音波を用いる SB 方式は初めての試みであるので、対象からの時間差検出方法をシミュレーションにより検討し、時間差検出法を相互相関方式に決定した。次に、広帯域での指向性関数補正のために、指向性関数モデルを作成し、実際に測定した指向性関数と比較した結果、両者が良く一致したことから、モデルを利用することとした。次に、広帯域 SB システムの性能を確認するため、金属球と送受波器との相対位置を変化させ、金属球の散乱特性を測定したところ、理論値と実測値が良く一致した。最後に、この広帯域 SB システムを用いて海上実験を行い、高い距離分解能を有したまま、自然状態の魚の TS スペクトルを測定することに成功した。

イルカのソーナー音の他のメリットを探るために、ほぼ同じパルス幅の短バースト波との比較実験を行った。イルカのソーナー音と短バースト波の両者による金属球の反射波に対して、それぞれの入射波を参照波として相互相関処理を行った。その結果、両者で 10 dB 程度信号対雑音比が向上し、またイルカのソーナー音の方が最大で 9 dB 高い信号対雑音比を得られた。一般に広帯域信号は雑音に弱い、イルカのような広帯域のソーナー音を用いれば、広帯域信号の弱点を補えることが示唆された。

以上、本研究により、高い距離分解能を有した状態で、広帯域で対象の TS スペクトルが精確に測定可能な、方法とシステムを開発できた。自然状態の魚の行動や姿勢変化を含んだ TS スペクトルの変化は、魚種識別、行動推定、サイズ推定などのための有用な情報である。イルカのような時間的に短く広帯域の音波を用いることで、音響資源量調査の大きな問題点の 1 つである個々の魚のエコーの測定条件の緩和を実現し、また、TS スペクトルという魚種識別などのための基礎情報増加を実現した。以上により、本研究は、音響を用いた資源量調査方法の発展に大きく寄与した。

No. 28, 47-113 (2009)

魚類の聴性誘発反応に関する基礎的研究

須賀友大（水産工学研究所）

魚類の聴覚閾値を計測する方法には心電図導出による刺激時の心拍間隔の伸長を指標とした方法（以下、心電図法）がよく使われてきたが、近年では人間でも実用化されている聴性誘発反応を測定する方法（以下、聴性誘発反応法）が使われるようになってきている。Kenyon ら（1998）は聴性誘発反応法と心電図法等で求めた聴覚閾値曲線の測定から聴性誘発反応法では手術を必要とせず、短時間で計測できる等の長所を示している。

本研究では魚類の聴覚閾値の計測法を発展させるために次の3つの課題、(1)スピーカ対向法による実験に近距離効果の影響が含まれているか、(2)聴性誘発反応波形の発生器官は何か、(3)魚体を完全に水中に置いた状態で聴性誘発反応が測定可能か、についての実験を行った。さらに水産有用魚種のイカナゴの聴覚閾値の測定とマイワシの超音波に対する応答を計測し、聴性誘発反応法の有用性について検討した。本研究では従来の電極接触部位のみを空中において測定する聴性誘発反応法を空中電極固定法と呼び、電極部分まですべて水中に沈めた状態で測定する方法を水中電極固定法と呼ぶことにする。

【実験方法】

近距離効果の影響 実験にはマコガレイ *Pleuronectes yokohamae* 10尾を使用した。実験は音圧のみが供試魚に刺激として与えられるように魚体全部を空中に保定して実験を行った。刺激はスピーカ対向法により放音し、閾値の測定には心電図法を用いた。刺激音は63 Hz, 100 Hz, 160 Hz, 200 Hz, 315 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 630 Hz, 1000 Hz の周波数を使用した。放音の感知の判定は、放音前の30拍の間隔と放音時の間隔で Mann Whitney の U 検定を行い、音刺激により心拍間隔が有意に伸びたことを指標とした。

聴性誘発反応の発生器官 実験は空中電極固定法で行った。聴覚特性を詳細に調べられているキンギョ *Carassius auratus* を使用した。供試魚は頭部を除いてネオプレーンゴムで包み、プラスチックのクリップで留め、クランプを使って保定した。反応導出電極にはテフロンコーティングされた直径0.1 mm のタングステンを使った。関電極は中脳中心部の頭部表皮から内部へ0.5 mm 挿入し、不関電極は関電極の5 mm 前方へ同様に挿入した。反応は生体電気アンプで増幅し、同じ音刺激に対する反応を300回加算平均してオシロスコープに記録した。刺激音は音波形を編集して出力できるソフトを使って作成し、オーディオアンプで増

幅し、反応波形から刺激音波形の影響を除去するために放音毎に位相を反転させ、空中スピーカから断続的に放音した。供試魚の位置での音圧はハイドロホンで測定した波形の振幅から求めた。刺激音は1 kHz で持続時間を変化させた音を使用した。

水中電極固定法 水中電極固定法では電極と電極に繋がれたコードの水没する部分を絶縁、防水する必要がある。そこで絶縁、防水できる自己融着テープを使って電極とコードの水没する部分を巻いた。さらにテープの隙間からの水の侵入を防ぐため、カシューを塗付した。電極は頭部に挿入してから生体接着剤を使って接着した。電極以外の実験方法は空中電極固定法と同様に行った。供試魚は各方法で同一個体を使用し、2つの実験法による比較が行えるようにした。刺激音は250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz を使用した。**イカナゴとマイワシの聴覚特性** 空中電極固定法を使用して実験を行った。イカナゴ *Ammodytes personatus* 13尾、マイワシ *Sardinops melanostictus* 8尾を使用した。イカナゴでは刺激音として128 Hz, 181 Hz, 256 Hz, 362 Hz, 512 Hz, マイワシでは40 kHz, 60 kHz, 80 kHz, 100 kHz と1.024 kHz の音を使った。刺激音の感知の判定は反応の振幅と波形の特徴から判断した。聴覚閾値は反応が観察できた時の最も小さい音圧とした。

【実験結果および考察】

心電図法で魚体を水中に置いた場合のマコガレイの聴覚閾値（Zhang, 1998）と本研究で魚体を空中においての場合の聴覚閾値を比較すると160 Hz 以下では本研究の値が高くなっている。魚体を水中においたスピーカ対向法では水粒子変位（近距離効果）を完全に抑えることができずに内耳と側線器が応答して聴覚閾値が低くなることがわかった。したがって音圧（遠距離効果）についての聴覚閾値を測定するためには実験方法を改良する必要があることがわかった。

聴性誘発反応発生器官の確認実験では各刺激音の持続時間とそれに対応した反応持続時間には正の相関があった。この特徴は内耳の小囊から直接導出されるマイクロホン電位等と同様であり、キンギョの聴性誘発反応は内耳の小囊、通囊や壺囊等の器官に由来して発生した反応電位が間接的に頭部表皮から記録されていると考えられる。

水中電極固定法を試みた実験では反応開始から負のピークまでと、負のピークから正のピークまでの時間、振幅の絶対値はいずれも空中電極固定法と有意差はなかった。電気ノイズの最大振幅と反応波形の最大振幅との比（S/N 比）に関しても同一刺激音に対する反応波形で有意差はなかった。聴覚閾値でも計測した周

波数で有意差はなかった。したがって防水処理を十分に行うことで魚体が水中にある場合でも聴性誘発反応を計測し、聴覚閾値を求めることが可能であることがわかった。

イカナゴで128~362 Hzで得られた聴性誘発反応波形はFFTの結果から刺激音周波数の約2倍の周波数成分を持ち、基線が振動する特徴があった。聴覚閾値は128~256 Hzの範囲で低くなり、113~118 dBであった。漁船から100 m離れた距離で騒音は100~500 Hzで127~146 dBであり、マスキング現象を考慮しても騒音を感知していると考えられる。マイワシの超音波への反応波形は先行研究での超音波が聴こえる魚種のような、下に凸のV字型の特徴は見られず、反応らしき波形振幅も見られなかった。マイワシは本研究で用いた超音波を音圧180~190 dBの範囲で感知しないと考えられる。マイワシの超音波に対する聴覚特性はこれまで計測されたことはなく、本研究の結果では超音波を感知していないと考えられたが、他のニシン科の魚類についても調査し、資源量調査に使用されている魚群探知器の周波数との関連についても明らかにする必要がある。

聴性誘発反応法は短時間で実験を終わらせる必要のあるマイワシのような魚種、さらに電極を接触させることで手術なしに聴覚閾値が測定できることからイカナゴの様な小型魚でも有効な方法であることがわかる。

魚類の生棲する環境には様々な音が存在しており聴覚閾値の最も低い周波数とその魚類にとってどのような利点があるのか、どのような周波数を人間が利用可能か等、解明すべき点は多くある。このためには幼稚魚からマグロ等の高速遊泳魚まで広い範囲の魚種の聴覚特性の計測が必要であり、聴性誘発反応法は現在用いられている方法では最適である。したがって、電極の材質、寸法、取り付け方法を改善するとともに閾値判定をより客観的に判定できるシステムを確立することが必要となる。

水産総合研究センター研究報告

Bulletin of Fisheries Research Agency

編集委員会

編集委員長 馬場徳寿

編集委員 松尾 豊, 武内智行, 時村宗春, 平井光行, 川原重幸, 高柳和史,
鈴木満平, 北川大二, 杜多 哲, 野川秀樹, 丸山敬悟, 廣川純夫

平成21年3月31日 発行

発行所 独立行政法人 水産総合研究センター

〒220-6115 神奈川県横浜市西区みなとみらい2-3-3 クィーンズタワー B 15階

Fisheries Research Agency

Queen's Tower B 15F, 2-3-3, Minato mirai, Nishi-ku, Yokohama, Kanagawa.

220-6115 Japan

<http://www.fra.affrc.go.jp>

発行者 中前 明

印刷所 日昇印刷株式会社

ISSN 1346-9894

BULLETIN OF FISHERIES RESEARCH AGENCY

No. **28**
March 2009

Bull. Fish. Res. Agen.

CONTENTS

Doctoral Thesis

Study on the fisheries biology of lizardfishes, *Saurida umeyoshii* in the East China Sea and *Saurida elongata* in Tsushima/Korea Strait

Takeshi SAKAI 1

Doctoral Thesis

The study on application of dolphin's sonar abilities to echo sounders

Tomohito IMAIZUMI 47

Doctoral Thesis

Basic study for fish auditory brainstem response

Tomohiro SUGA 118

Abstracts (JAPANESE) 171